

VILNIAUS GEDIMINO TECHNIKOS UNIVERSITETAS

Deividas RUMŠYS

KONSTRUKCINIO ARMUOTO LENGVOJO BETONO LENKIAMŲJŲ ELEMENTŲ DEFORMACIJŲ ANALIZĖS MODELIS

DAKTARO DISERTACIJA

TECHNOLOGIJOS MOKSLAI,
STATYBOS INŽINERIJA (T 002)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Disertacija rengta 2014–2019 metais Vilniaus Gedimino technikos universitete.

Vadovas

doc. dr. Darius BAČINSKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Vilniaus Gedimino technikos universiteto Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo taryba:

Pirmininkas

prof. dr. Romualdas KLIUKAS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Nariai:

prof. habil. dr. Gintautas DZEMYDA (Vilniaus universitetas, informatikos inžinerija – T 007),

prof. dr. Ainars PAEGLITIS (Rygos technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002),

dr. Rimvydas STONYS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, medžiagų inžinerija – T 008),

prof. dr. Juozas VALIVONIS (Vilniaus Gedimino technikos universitetas, statybos inžinerija – T 002).

Disertacija bus ginama viešame Statybos inžinerijos mokslo krypties disertacijos gynimo tarybos posėdyje **2019 m. birželio 14 d. 14 val.** Vilniaus Gedimino technikos universiteto senato posėdžių salėje.

Adresas: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lietuva.

Tel.: (8 5) 274 4956; faksas (8 5) 270 0112; el. paštas doktor@vgtu.lt

Pranešimai apie numatomą ginti disertaciją išsiųsti 2019 m. gegužės 13 d.

Disertaciją galima peržiūrėti VGTU talpykloje <http://dspace.vgtu.lt> ir Vilniaus Gedimino technikos universiteto bibliotekoje (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lietuva).

VGTU leidyklos TECHNIKA 2019-019-M mokslo literatūros knyga
<http://leidykla.vgtu.lt>

ISBN 978-609-476-172-0

© VGTU leidykla TECHNIKA, 2019

© Deividas Rumšys, 2019

deividas.rumsys@vgtu.lt

VILNIUS GEDIMINAS TECHNICAL UNIVERSITY

Deividas RUMŠYS

MODEL FOR DEFORMATIONAL ANALYSIS
OF REINFORCED STRUCTURAL
LIGHTWEIGHT CONCRETE
FLEXURAL MEMBERS

DOCTORAL DISSERTATION

TECHNOLOGICAL SCIENCES,
CIVIL ENGINEERING (T 002)



LEIDYKLA
Vilnius TECHNIKA 2019

Doctoral dissertation was prepared at Vilnius Gediminas Technical University in 2014–2019.

Supervisor

Assoc. Prof. Dr Darius BAČINSKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The Dissertation Defence Council of Scientific Field of Civil Engineering of Vilnius Gediminas Technical University:

Chairman

Prof. Dr Romualdas KLIUKAS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

Members:

Prof. Dr Habil. Gintautas DZEMYDA (Vilnius University, Informatics Engineering – T 007),

Prof. Dr Ainars PAEGLITIS (Riga Technical University, Latvia, Civil Engineering – T 002).

Dr Rimvydas STONYŠ (Vilnius Gediminas Technical University, Materials Engineering – T 008),

Prof. Dr Juozas VALIVONIS (Vilnius Gediminas Technical University, Civil Engineering – T 002).

The dissertation will be defended at the public meeting of the Dissertation Defence Council of Civil Engineering in the Senate Hall of Vilnius Gediminas Technical University at **2 p. m. on 14 of June 2019**.

Address: Saulėtekio al. 11, LT-10223 Vilnius, Lithuania.

Tel.: +370 5 274 4956; fax +370 5 270 0112; e-mail: doktor@vgtu.lt

A notification on the intend defending of the dissertation was send on 13 of May 2019.

A copy of the doctoral dissertation is available for review at VGTU repository <http://dspace.vgtu.lt> and at the Library of Vilnius Gediminas Technical University (Saulėtekio al. 14, LT-10223 Vilnius, Lithuania).

Reziumė

Disertacijoje nagrinėjamos trumpalaikė apkrova veikiamų armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų deformacijos. Sukurti konstrukcinio lengvojo betono mišiniai, kurie panaudoti eksperimentinių sijų gamyboje. Atlikus sijų eksperimentinius tyrimus ir pritaikius atvirkštinio uždavinio algoritmą, gautos tempiamojo armuoto lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos. Išanalizavus gautas diagramas, pasiūlytas modifikuotas armuoto tempiamojo betono fizikinis modelis, kuriame įvertinama lengvojo užpildo įtaka. Pasiūlyta modelio atitiktis įvertinta atlikus kitų autorių paskelbtų eksperimentinių lengvojo betono sijų netiesinę skaitinę analizę kompiuterine baigtinių elementų programa.

Pagrindinis disertacijos tikslas – pasiūlyti fizikinį modelį trumpalaikė apkrova veikiamų konstrukcinio armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų įtempių ir deformacijų būviui analizuoti. Darbe sprendžiami keli pagrindiniai uždaviniai: atliekama armuoto lengvojo betono fizikinių modelių apžvalga, parenkama lengvojo betono sudėtis, atliekami eksperimentiniai armuoto betono elementų tyrimai, nustatomos armuoto tempiamo betono įtempių ir deformacijų diagramos, pasiūlomas armuoto tempiamo betono fizikinis medžiagos modelis, atliekamas modelio adekvatumo vertinimas bei realaus dydžio konstrukcijų skaitinis modeliavimas.

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriaai, bendrosios išvados, naudotos literatūros ir autorius publikacijų disertacijos tema sąrašai bei trys priedai.

Įvadiniamе skyriuje aptariama tiriamoji problema, darbo aktualumas, aprašomas tyrimų objektas, formuluojamas darbo tikslas bei uždaviniai, aprašoma tyrimų metodika, darbo mokslinis naujumas, darbo rezultatų praktinė reikšmė, ginamieji teiginiai.

Pirmajame skyriuje atlikta literatūros analizė, kurioje pateikta lengvojo betono istorinė apžvalga ir pagrindinės savybės, fizikiniai medžiagos modeliai ir skaitiniai metodai.

Antrajame skyriuje pateiktas lengvojo betono sudėties parinkimas. Taip pat tyrinėjamas lengvojo betono ilgaamžiškumo klausimas.

Trečiajame skyriuje aprašomi atlikti armuoto lengvojo betono sijų eksperimentiniai tyrimai.

Ketvirtajame skyriuje pateikiamas lengvojo betono teorinis medžiagų modelio išvedimas ir jo adekvatumo įvertinimas skaitiniu metodu. Taip pat pateikiami natūralaus dydžio konstrukcijų skaitinio modeliavimo rezultatai.

Disertacijos tema paskelbti 8 straipsniai: vienas iš jų žurnale turinčiame citavimo rodiklį, du – konferencijų medžiagose, referuojamose *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazės *Conference Proceedings* leidiniuose. Disertacijos tema skaityti 5 pranešimai tarptautinėse ir Lietuvos konferencijose.

Abstract

This thesis is focused on deformation behaviour of lightweight concrete (LWC) flexural members subjected to short-term loading. Several mixtures of structural LWC has been developed and applied for production of experimental beams. The inverse analysis approach has been applied for deriving the tension-stiffening model of the LWC flexural members. Based on the test data, the earlier proposed tension-stiffening model has been modified to represent the effects of lightweight aggregates. The adequacy of the proposed model is analysed using test data reported in the literature via nonlinear finite element software.

The main aim of the thesis – to propose a physical model for stress–strain analysis of reinforced lightweight concrete flexural elements subjected to short-term loading. Several tasks are set in this thesis: to perform a review of physical models of reinforced LWC, to select mix composition of LWC, to conduct experimental research of reinforced concrete elements, to obtain stress–strain diagrams for reinforced concrete in tension, to propose constitutive model of reinforced concrete in tension, to perform evaluation of the adequacy of the proposed model, to perform numerical modelling of full size reinforced LWC structures.

The thesis consists of an introduction, four main chapters summarized below, general conclusions, list of references and author's publications on the topic of thesis, and three annexes.

The introduction discusses the research problem, the relevance of the thesis, describes the object of the research, formulates the aim and objectives, describes the research methodology, scientific novelty of the thesis, practical value of research findings, defended statements.

The first chapter deals with the literature review. It presents a historical overview of lightweight concrete and its main features, physical material models and numerical models.

The second chapter presents the selection of lightweight concrete composition. The issue of the durability of lightweight concrete is also studied.

The third chapter describes experimental research on reinforced lightweight concrete elements.

The fourth chapter presents the theoretical derivation of the material model of LWC and evaluation of its adequacy by applying the numerical method. The results of numerical modelling of full-size structures are also presented.

There are 8 scientific publications published on the topic of this thesis, one in a journal with Impact Factor, two – in Conference Proceedings which are referenced in the Clarivate Analytics Web of Science database. The results of the research conducted in the thesis were published in 5 reports at international and national scientific conferences.

Žymėjimai

Simboliai

- a_1 – apsauginis betono sluoksnis iki tempiamosios armatūros centro;
- a_2 – apsauginis betono sluoksnis iki gniuždomosios armatūros centro;
- A_{s1} – tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas;
- A_{s2} – gniuždomosios armatūros skerspjūvio plotas;
- b – skerspjūvio plotis;
- d – efektyvusis skerspjūvio aukštis;
- E_{lcm} – lengvojo betono vidutinis tamprumo modulis;
- f_{lcm} – vidutinis lengvojo betono gniuždomasis cilindrinis stipris;
- f_{lctm} – vidutinis lengvojo betono tempiamasis stipris;
- h – elemento aukštis;
- L – tarpatramis;
- M – veikiantis lenkimo momentas;
- M_{cr} – lenkimo momentas, prie kurio atsiranda pirmasis plyšys;
- M_{ed} – suminis skaičiuotinis lenkimo momentas;
- M_{gk} – lenkimo momentas nuo charakteristinės nuolatinės apkrovos;
- M_k – suminis charakteristinis lenkimo momentas;
- M_{naud} – lenkimo momentas esant naudojimo apkrovos lygiui;

M_{qk}	– lenkimo momentas nuo charakteristinės laikinosios apkrovos;
M_{Rm}	– atlaikomas lenkimo momentas;
V_k	– variacijos koeficientas;
x_{vid}	– vidurkio reikšmė;
Δ	– įlinkis;
ε	– deformacija;
ε_{cr}	– pleišėjimo deformacija;
ε_{ct}	– betono tempimo deformacija;
ε_{shr}	– susitraukimo deformacija;
κ	– kreivis;
κ_{eksp}	– eksperimentinis kreivis;
κ_{teor}	– teorinis kreivis;
ρ	– betono tankis;
ρ_R	– armavimo procentas;
σ	– įtempiai;
σ_{ct}	– tempiamieji įtempiai;
σ_{std}	– standartinis nuokrypis.

Santrumpos

ACI	– Jungtinių Amerikos Valstijų gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normos (ACI 318:2014);
EC2	– Europos gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo normos (LST EN 1992-1-1:2005);
ECA	– keramzito užpildas;
EGA	– stiklo granuliu užpildas;
K(2–4)	– keramzitas, kurio frakcija 2–4 mm;
LB	– lengvasis betonas;
MC2010	– Model Code 2010 projektavimo normos;
MKS	– maltas kvarcinis smėlis;
MS	– silicio dioksido mikrodulkės;
NB	– normalusis betonas (įprasto svorio betonas);
PS(0,5–1)	– pūstas stiklas, kurio frakcija 0,5–1 mm;
SSLB	– savaime sutankėjantis lengvasis betonas;
STR	– Lietuvos betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimo statybos techninis reglamentas (STR 2.05.05:2005);
V/C	– vandens ir cemento kiekio santykis.

Turinys

IVADAS	1
Problemos formulavimas.....	1
Darbo aktualumas.....	2
Tyrimų objektas	3
Darbo tikslas.....	4
Darbo uždaviniai	4
Tyrimų metodika.....	5
Darbo mokslinis naujumas	5
Darbo rezultatų praktinė reikšmė	6
Ginamieji teiginiai.....	6
Darbo rezultatų aprobavimas.....	6
Disertacijos struktūra.....	7
Padėka	7
1. LENGVOJO BETONO ELEMENTŲ FIZIKINIŲ MODELIŲ IR ANALIZĖS METODŲ APŽVALGA	9
1.1. Poreikio pagrindimas, privalumai ir trūkumai bei istorinė apžvalga	9
1.2. Lengvojo betono užpildai ir jų klasifikacija	14
1.3. Lengvojo betono fizikinės, technologinės ir mechaninės savybės	17
1.3.1. Fizikinės savybės	17
1.3.2. Technologinės savybės	22
1.3.3. Mechaninės savybės	24

1.4. Armuoto lengvojo betono elementų laikomosios galios ir deformacijų skaičiavimo metodai.....	31
1.4.1. Lenkiamųjų elementų normalinio pjūvio stiprumas	32
1.4.2. Deformacijų (kreivių) apskaičiavimo metodai	33
1.5. Lengvojo betono fizikiniai modeliai ir skaitiniai metodai, taikomi deformacijų analizei	38
1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir uždavinių formulavimas.....	45
2. LENGVOJO BETONO SUDETIES PARINKIMAS	47
2.1. Sudedamosios dalys ir savybės	47
2.2. Bandymų metodika ir įranga	51
2.2.1. Mechaninės ir fizikinės savybės	51
2.2.2. Ilgaamžiškumas	52
2.2.3. Mišinių paruošimas ir laikymo sąlygos	53
2.2.4. Reologinės savybės.....	54
2.3. Bandymų rezultatai	55
2.3.1. Mišinių su skirtingais plastiko užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai.....	56
2.3.2. Mišinių su pūsto stiklo užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai	59
2.3.3. Mišinių su pūsto stiklo ir keramzito užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai	64
2.3.4. Mišinių su keramzito užpildu mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai	68
2.3.5. Pasirinktų mišinių reologinių savybių tyrimas.....	70
2.3.6. Pasirinktų mišinių ilgaamžiškumo savybių tyrimas.....	72
2.4. Antrojo skyriaus išvados	74
3. ARMUOTŲ LENGVOJO BETONO SIJŲ EKSPERIMENTINIAI TYRIMAI	77
3.1. Naudotų medžiagų savybės	78
3.2. Eksperimentiniai elementai	79
3.3. Bandymo metodika ir įranga	82
3.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai	83
3.5. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų sugretinimas.....	87
3.6. Trečiojo skyriaus išvados	93
4. LENGVOJO BETONO FIZIKINIS MODELIS IR LENKIAMŲJŲ ELEMENTŲ DEFORMACIJŲ ANALIZĖ	95
4.1. Fizikinio modeliavimo algoritmas.....	96
4.2. Tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų fizikinis modelis	97
4.3. Pasiūlyto fizikinio modelio adekvatumo įvertinimas	102
4.4. Natūralaus dydžio lengvojo armuoto betono lenkiamųjų elementų skaitinis modeliavimas	109
4.4.1. Elementų duomenys ir modeliavimo metodika	109
4.4.2. Modeliavimo rezultatai	112
4.5. Ketvirtąjo skyriaus išvados	116
BENDROSIOS IŠVADOS	119
LITERATŪRA IR ŠALTINIAI.....	123

AUTORIAUS MOKSLINIŲ PUBLIKACIJŲ DISERTACIJOS TEMA SĄRAŠAS..	139
SUMMARY IN ENGLISH.....	141
PRIEDAI*	157
A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija.....	158
B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje	159
C priedas. Autoriaus publikacijų disertacijos tema kopijos	170

* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Contents

INTRODUCTION	1
Problem formulation	1
Relevance of the thesis	2
Research object	3
Aim of the thesis	4
Objectives of the thesis	4
Research methodology	5
Scientific novelty of the thesis	5
Practical value of the research findings.....	6
Defended statements	6
Approval of the research findings	6
Structure of the thesis	7
Acknowledgements	7
1. OVERVIEW OF PHYSICAL MODELS AND ANALYSIS METHODS OF LIGHTWEIGHT CONCRETE ELEMENTS	9
1.1. Justification of needs, advantages and disadvantages and historical overview	9
1.2. Aggregates of lightweight concrete and their classification.....	14
1.3. Physical, technological and mechanical properties of lightweight concrete	17
1.3.1. Physical properties.....	17
1.3.2. Technological properties.....	22
1.3.3. Mechanical properties.....	24

1.4. Methods for calculating resistance and deformations of reinforced lightweight concrete elements	31
1.4.1. Flexural capacity of beams	32
1.4.2. Methods of calculating deformations (curvatures)	33
1.5. Physical models and numerical methods of lightweight concrete for deformation analysis	38
1.6. Conclusions of the Chapter 1 and formulation of tasks of the thesis.....	45
2. SELECTION OF LIGHTWEIGHT CONCRETE COMPOSITION	47
2.1. Components and properties	47
2.2. Test methodology and equipment	51
2.2.1. Mechanical and physical properties	51
2.2.2. Durability	52
2.2.3. Preparations of mixtures and storage conditions	53
2.2.4. Rheological properties	54
2.3. Test results	55
2.3.1. Research of mechanical and physical properties of mixtures with different plastic aggregates	56
2.3.2. Research of mechanical and physical properties of mixtures with expanded glass aggregates	59
2.3.3. Research of mechanical and physical properties of mixtures with expanded glass and expanded clay aggregates	64
2.3.4. Research of mechanical and physical properties of mixtures with expanded clay aggregates	68
2.3.5. Investigation of rheological properties of selected mixtures	70
2.3.6. Investigation of durability properties of selected mixtures	72
2.4. Conclusions of the Chapter 2	74
3. EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF REINFORCED LIGHTWEIGHT CONCRETE BEAMS	77
3.1. Properties of used materials	78
3.2. Experimental elements	79
3.3. Test methodology and equipment	82
3.4. Results of experimental studies	83
3.5. Comparison of experimental and theoretical results	87
3.6. Conclusions of the Chapter 3	93
4. CONSTITUTIVE MODEL OF LIGHTWEIGHT CONCRETE AND DEFORMATION ANALYSIS OF FLEXURAL ELEMENTS	95
4.1. Algorithm of constitutive modelling	96
4.2. Tension-stiffening model of lightweight concrete	97
4.3. Adequacy assessment of proposed tension-stiffening model	102
4.4. Numerical modelling of real-size lightweight concrete flexural elements	109
4.4.1. Characteristics of elements and modelling methodology	109
4.4.2. Modelling results	112
4.5. Conclusions of the Chapter 4	116

GENERAL CONCLUSIONS	119
REFERENCES	123
THE LIST OF SCIENTIFIC PUBLICATIONS BY THE AUTHOR ON THE TOPIC OF THE DISSERTATION	139
SUMMARY IN ENGLISH.....	141
ANNEXES*	157
Annex A. Declaration of academic integrity	158
Annex B. Agreements of co-authors to provide published materials in the dissertation.....	159
Annex C. Copies of scientific publications by the author on the topic of the dissertation.....	170

* The annexes are supplied in the enclosed compact disc.

Įvadas

Problemos formulavimas

Disertacijoje nagrinėjamą problemą galima apibendrinti medžiagų inžinerijos ir konstrukcijų mechanikos aspektais. Tradiciniuose betono mišinių optimizavimo tyrimuose medžiagos savybės dažniausiai nagrinėjamos tik vienu ar keliais aspektais, pvz., sudėties optimalumo, mechaninio atsparumo, ilgaamžiškumo ir kt. Vieno ar kelių parametrų įtakos elemento elgsenai tyrimas dažnai neduoda galutinio laukiamo efekto. Medžiagų savybių gerinimas vienu aspektu dažnai lemia kitų parametrų kaitą (dažnai į blogesnę pusę). Kita vertus, medžiagų inžinerijos srityje rezultatai dažniausiai gaunami tiriant nedidelių gabaritų bandinius, kurių elgsena dažniausiai neatspindi laikančiosioms statinių konstrukcijoms naudojamų elementų technologinių ir mechaninių elgsenos ypatumų. Šiems elementams naudojamas betonas privalo būti tiriamas integraliai, pradedant nuo sudėties optimalumo ir baigiant galutinio produkto (konstrukcinių elementų) elgsenos įvertinimu imituojuojant realias eksploatacijos sąlygas. Pabrėžtina, kad disertacijoje tiriamas konstrukcinis lengvasis betonas. Pasaulyje pasiūlyta daug mažo tankio lengvojo betono sudėčių, kurios naudojamos tik atitvarinėms konstrukcijoms, pasižyminčioms geromis termoizoliacinėmis ir akustinėmis savybėmis, tačiau maža laikomąja geba.

Inžinerinėje praktikoje armuoto lengvojo betono elementų analizei dažniausiai taikomi tie patys algoritmai kaip ir normaliojo betono elementams. Lengvojo betono įtaka konstrukcijos elgsenai įvertinama papildomais empiriniais koeficientais, priklausančiais nuo tankio. Toks lengvojo betono elgsenos prognozavimas dažnai neatitinka realios konstrukcijos elgsenos: tiek plyšių plotis, tiek lengvojo betono konstrukcinių elementų deformacijos nėra pakankamai vertinamos, o paklaidos gali siekti daugiau nei 100 %. Šias tendencijas galima paaiškinti tuo, kad lengvasis betonas turi nemažai skirtumų, lyginant su normaliuoju. Visų pirma lengvojo betono savybės labai priklauso nuo mišiniams taikomų lengvųjų užpildų tipo, kiekio ir mechaninių savybių, taip pat nuo betono mišinių paruošimo technologijos. Šie aspektai tradiciniais inžineriniais metodais yra sunkiai įvertinami, nes buvo sukurti ilgus metus tobulintiems normalaus svorio betono mišiniams.

Kitas svarbus aspektas – susitraukimo deformacijų nevertinimas stadijoje iki apkrovimo. Kai kurie tyrėjai pažymi, kad būtent betono susitraukimas derinyje su mažesniu tempiamuoju stipriu lemia ankstesnį armuoto lengvojo betono elementų pleišėjimą, nei leidžia prognozuoti tradiciniai inžineriniai metodai.

Konstrukcijų projektavime, kaip alternatyva tradiciniams inžineriniams metodams, dažnai naudojami skaitiniai algoritmai. Šiose algoritmuose taikomi fizikiniai medžiagų modeliai, atspindintys elementų elgsenos aspektus įvairiose eksploatacijos stadijose. Užsienyje ir Lietuvoje tradicinių gelžbetoninių elementų analizei pasiūlyta nemažai fizikinių modelių. Vis dėlto nepavyko rasti nė vieno armuotam lengvajam betonui pasiūlyto modelio.

Darbo aktualumas

Daugelyje pasaulio šalių įprasto gelžbetonio konstrukcijų statiniai sudaro didžiąją dalį visų statinių. Lyginant su kitomis statybinėmis medžiagomis (plienu, mediena, plastikui, aliuminiui), betono gamybos apimtis yra dvigubai didesnė nei kitų medžiagų kartu sudėjus. Prognozuojama, kad iki 2050 m. betono gamybos apimtis pasaulyje gali siekti ~28 mlrd. t per metus ir keturis kartus viršys 1990 m. lygmenį. Nepaisant esminių šios kompozitinės medžiagos privalumų, ji turi ir nemažai trūkumų. Vienas iš pagrindinių – didelė tūrio masė, kuri dažnai riboja jo naudojimą didelių gabaritų statiniams: tiltams, daugiaaukščiams pastatams ir kt. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių betono mišinių paiešką. Vienas iš šios problemos sprendimo būdų – lengvinti betoną. Taikant šiuolaikinius technologinius sprendimus, atsiranda galimybė kurti sudėtis, kurių savybės yra tokios pat, o kartais ir pranašesnės, lyginant su normaliuoju betonu, o tūrio svoris iki 40 % mažesnis. Konstrukcinio lengvojo betono naudojimas statiniams turi daug privalumų. Visų pirma, jis turi efektyvesnį stiprio ir savojo svorio santykį, dėl to mažėja reikiamo betono ir armatūros kiekis, atsiranda galimybė statyti didesnio

aukščio pastatus ir sumažinti pamatų įrengimo išlaidas. Šiuo aspektu lengvojo betono naudojimas ypač svarbus stiprinant ar rekonstruojant eksploatuojamus statinius (pvz., tiltus), kai papildomai apkrauti atramų ar pamatų negalima. Kita vertus, lengvasis betonas turi geresnes šilumos ir garso izoliacines savybes. Pasaulyje atlikti tyrimai parodė, kad tuo atveju, jei pastatams Europoje vietoje normaliojo betono būtų panaudotas lengvasis, šilumos energijos sąnaudas galima būtų sumažinti apie 15 %. Be minėtų privalumų, palyginti su normaliaisiais betonais, lengvasis betonas pasižymi geresnėmis ilgaamžiškumo savybėmis (jų didesnis atsparumas šalčiui ir kt.), didesniu atsparumu gaisrui ir seisminėms apkrovoms.

Papildomų galimybių suteikia savaime tankėjančio betono mišinių naudojimas. Mažesnė tūrio masė ir savaiminis tankėjimas gerina eksploatacines ir technologines betono ir iš jų gaminamų elementų savybes. Savaime tankėjantys mišiniai, kurių nereikia papildomai tankinti gamybos metu, konstrukcijų kainą vidutiniškai sumažina apie 10 %, o jų gamybos trukmę – iki 20 %.

Nepaisant to, kad tiek užsienyje, tiek Lietuvoje nagrinėjamos srities inovatyvių inžinerinių sprendimų paieškai skirta daug teorinių tyrimų, jų praktinį naudojimą dažniausiai riboja patikimų fizikinių modelių ir skaičiavimo metodų stoka. Lengvasis betonas – išskirtinė medžiaga, kurios savybes lemia ne tik naudojami užpildai ir priedai, bet ir mišinių gamybos technologija. Šiuo požiūriu lengvojo betono konstrukcijų analizei svarbu taikyti universalius fizikinius modelius, leidžiančius įvertinti šios medžiagos elgsenos ypatumus visame gyvavimo cikle. Disertacijoje analizuojami tyrimai fizikinio modeliavimo aspektu yra vieni pirmųjų Lietuvoje. Praktiniu požiūriu gauti rezultatai ne tik sudaro sąlygas diegti inovacijas versle, bet ir skatina tolesnę darnią inovatyvių sprendimų plėtrą Lietuvoje, keičiant ilgus metus šalies statybos pramonėje nusistovėjusias tradicijas. Disertacijoje atlikti tyrimai yra jau daugiau nei 20 metų VGTU mokslininkų grupės vykdomų tyrimų armuoto betono elementų fizikinio modeliavimo ir deformacijų analizės srityje tęsa.

Tyrimų objektas

Darbe nagrinėjamas konstrukcinis lengvasis betonas, kurio gniuždomojo stiprio klasė būtų ne mažesnė kaip LC30/33, o tankis ne didesnis nei 2000 kg/m^3 . Tiriama lengvojo betono mišiniai, jų fizikinės, mechaninės ir ilgaamžiškumo savybės. Atlikti lenkiamųjų armuoto lengvojo betono elementų eksperimentiniai tyrimai, apimančius bandymus statine trumpalaikę apkrovą ir susitraukimo matavimus stadijoje iki eksploatacijos. Remiantis šiais rezultatais, modifikuotas VGTU sukurtas supleišėjęsio tempiamojo betono fizikinis modelis, įvertinantis lengvojo betono elgsenos ypatumus ir susitraukimą stadijoje iki eksploatacijos. Įvertintas pasiūlyto

modelio adekvatumas remiantis inžinerinėje praktikoje taikomais projektavimo normų algoritmais.

Darbo tikslas

Darbo tikslas – pasiūlyti fizikinį modelį trumpalaikę apkrova veikiamų konstrukcinio armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų įtempių ir deformacijų būviui analizuoti.

Darbo uždaviniai

Darbo tikslui pasiekti sprendžiami šie uždaviniai:

1. Atlikti armuoto lengvojo betono fizikinių, mechaninių ir ilgaamžiškumo savybių analizę, taip pat armuoto betono elementų fizikinių modelių bei skaičiavimo metodų apžvalgą.
2. Naudojant skirtingus užpildus ir jų derinius, parinkti lengvojo betono mišinių sudėtis ir atlikti šių sudėčių fizikinių, mechaninių ir ilgaamžiškumo savybių eksperimentinius tyrimus.
3. Pasirinktas sudėtis pritaikyti eksperimentinių lenkiamųjų armuoto betono elementų gamybai ir išbandyti juos trumpalaikę statinę apkrovą.
4. Taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą, nustatyti supleišėjusio armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas, įvertinant betono susitraukimo deformacijas stadijoje prieš apkrovimą.
5. Aproximuojant gautus rezultatus, pasiūlyti armuoto lengvojo betono fizikinį modelį lenkiamųjų elementų analizei esant trumpalaikę apkrovą.
6. Pasiūlytą modelį pritaikyti kitų autorių atliktų eksperimentinių sijų skaitinei įtempių ir deformacijų analizei, įvertinti siūlomojo modelio adekvatumą, palyginti su projektavimo normose taikomais inžineriniais metodais.
7. Atlikti natūralaus dydžio armuoto lengvojo betono lenkiamųjų konstrukcinių elementų skaitinį modeliavimą, gautus rezultatus palyginat su rezultatais, gautais tradiciniams gelžbetoniniams elementams.

Tyrimų metodika

Darbe taikyti eksperimentiniai, analitiniai ir skaitiniai metodai. Eksperimentinėje lengvojo betono sudėties parinkimo programoje sudedamųjų dalelių ir lengvųjų betonų fizikinės, mechaninės ir technologinės savybės nustatytos vadovaujantis darniaisiais LST EN standartais. Betono struktūra tirta skenuojančiosios elektroninės mikroskopijos metodu. Eksperimentinėje armuotų lenkiamųjų elementų programoje gautos momentų ir kreivių priklausomybės, kurios, taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą, panaudotos fizikinio modelio aproksimacijai. Pasiūlytojo modelio adekvatumas įvertinamas atliekant kitų autorių paskelbtų eksperimentinių duomenų statistinę analizę.

Darbo mokslinis naujumas

- Lengvojo betono elgsena tyrinėta tarpdalykiniu požiūriu, jungiant medžiagų inžinerijos ir statybinių konstrukcijų tyrimų ypatumus.
- Pirmą kartą Lietuvoje pasiūlyti savaime sutankėjančio lengvojo betono mišiniai, kuriems panaudoti keramzitas ir perdirbto stiklo granulės, taip pat jų deriniai.
- Parinkti mišiniai panaudoti armuotų sijų eksperimentiniams tyrimams, kurių rezultatai išryškino betonų iš skirtingų mišinių elgsenos ypatumus bei jų galimybes konstrukciniam praktiniam taikymui.
- Taikant VGTU sukurta atvirkštinio uždavinio algoritmą ir atliktų eksperimentinių tyrimų duomenis, skirtingų mišinių eksperimentiniams elementams nustatytos supleišėjusio armuoto betono įtempių ir deformacijų diagramos, kurias aproksimavus pasiūlytas lengvojo armuoto betono fizikinis modelis šių elementų deformacijų analizei.
- Fizikinis modelis pritaikytas literatūroje paskelbtų eksperimentinių lengvojo betono armuotų sijų lyginamajai skaitinei analizei, kuri patvirtino pasiūlyto modelio adekvatumą ir tikslumą inžinerinėje praktikoje taikomų projektavimo normų metodų atžvilgiu.
- Lengvojo betono mišinių naudojimo laikančiosioms statinių konstrukcijoms įvertinti atlikta natūralaus dydžio perdangos plokštės ir dviatramės sijos skaitinė analizė, kuri atskleidė lengvojo betono praktinio naudojimo aspektus.

Darbo rezultatų praktinė reikšmė

Tyrimų metu, naudojant skirtingus lengvuosius užpildus ir jų derinius, sukurtos lengvojo betono sudėtys. Pasiūlyti savaime tankėjantis lengvojo betono mišiniai, kuriuos naudojant galima sumažinti konstrukcijos gamybos trukmę ir kainą. Pasiūlytas supleišėjęsio lengvojo betono fizikinis modelis, kuriame įvertinamas esminis šių medžiagų charakterizuojantis ypatumas – mažesnė tradiciniam betonui pleišėjimo riba, kurią lemia mažas lengvųjų užpildų mechaninis atsparumas bei susitraukimo deformacijos iki apkrovimo. Ateityje atlikus papildomus tyrimus bei įvertinus armuoto lengvojo betono atsparumą įstrižajame pjūvyje, ilgalaikius susitraukimo ir valkšnumo efektus, betono ir armatūros sukibimo aspektus, pasiūlytas algoritmas gali tapti puikia priemone armuoto lengvojo betono laikančiosioms konstrukcijoms projektuoti.

Ginamieji teiginiai

1. Išlaikant tą patį lengvojo užpildo tūrį mišinyje, geriausi rezultatai tankio ir gniuždomojo stiprio požiūriu gaunami derinant skirtingo tipo ir dydžio keramzito bei pūsto stiklo lengvuosius užpildus.
2. Pūsto stiklo užpildas lengvojo betono mišiniuose gali būti naudojamas be apribojimų, susijusių su šarmine korozija.
3. Dėl lengvojo užpildo mažo mechaninio atsparumo lengvojo armuoto tempiamojo betono fizikiniame modelyje maksimalūs pleišėjimo įtempiai yra vidutiniškai 45 % mažesni nei tradicinio betono elementuose.
4. Pasiūlytas lengvojo betono fizikinis modelis gali būti naudojamas kaip įrankis projektavimo normų metodų tobulinimui ir lengvojo betono elementų skaitiniam modeliavimui veikiant trumpalaikiai apkrovai.

Darbo rezultatų aprobavimas

Disertacijos tema paskelbtos aštuonios mokslinės publikacijos, iš kurių viena žurnale, turinčiame cituojamumo rodiklį, dvi – konferencijų rinkiniuose, referuojamuose *Clarivate Analytics Web of Science* duomenų bazėje.

Disertacijoje atlikti tyrimai prisidėjo prie Lietuvos mokslo tarybos finansuoto mokslininkų grupės projekto „Armuto savaime sutankėjančio lengvojo betono elementų fizikinių modelių kūrimas ir taikymas“ rezultatų.

Disertacijoje atliktų tyrimų rezultatai buvo paskelbti penkiuose pranešimuose, skaitytuose keturiuose mokslinėse konferencijose:

- Tarptautinėje konferencijoje „Civil and Environmental Engineering“ 2018 m., Barselonoje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Modern Building Materials, Structures and Techniques“, 2017 m. Vilniuje;
- Tarptautinėje konferencijoje „Mechanika 2015“, 2015 m. Kaune
- Jaunųjų mokslininkų konferencijoje „Mokslas – Lietuvos ateitis“, 2014, 2017 m., Vilniuje;
- 7-ojoje respublikinėje konferencijoje „Statybinės konstrukcijos“, 2018 m., Vilniuje.

Disertacijos tema paskelbtas vienas straipsnis mokslo populiarinimo leidinyje „Statyba ir architektūra“ ir skaitytas pranešimas 7-ojoje respublikinėje konferencijoje „Statybinės konstrukcijos“, 2018 m., Vilniuje.

Disertacijos struktūra

Disertaciją sudaro įvadas, keturi skyriai ir bendrosios išvados. Taip pat yra 3 priedai. Darbo apimtis – 157 puslapių, neskaitant priedų, tekste panaudotos 72 numeruotos formulės, 43 paveikslai ir 25 lentelės. Rašant disertaciją buvo panaudoti 228 literatūros šaltiniai.

Padėka

Disertacinio darbo autorius nuoširdžiai dėkoja savo mokslinio darbo vadovui – Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedros profesoriui doc. dr. Dariui Bačinskui už idėjas, patarimus ir rekomendacijas rengiant disertaciją.

Už konsultacijas ir pagalbą rengiant disertaciją, autorius išreiškia didelę padėką Kompozitinių medžiagų laboratorijos mokslo darbuotojui dr. Edmundui Spuduliui, Gelžbetoninių konstrukcijų ir geotechnikos katedros profesoriui prof. habil. dr. Gintariui Kaklauskui, Metalinių ir kompozitinių konstrukcijų katedros profesoriui dr. Viktorui Gribniak. Už pagalbą ir draugiškumą atliekant eksperimentinius tyrimus autorius dėkoja Inovatyvių statybinių konstrukcijų laboratorijos vyresniajam mokslo darbuotojui dr. Aleksandrui Sokolov. Už galimybę pasinaudoti Statybinių medžiagų instituto laboratorine įranga autorius dėkoja šio instituto kolektyvui. Už vertingas pastabas ir rekomendacijas, kurios pagerino disertacinio darbo kokybę, autorius dėkoja prof. dr. Juozui Valivoniui, prof. dr. Romualdai Kliukui ir dr. Rimvydai Stoniui.

Disertacinio darbo autorius išreiškia padėką Lietuvos mokslo tarybai už finansinę paramą doktorantūros studijų metu. Taip pat dėkoja Švietimo mainų paramos fondui ir COST organizacijai už finansavimą bei suteiktą galimybę stažuotis užsienyje.

Už nuolatinį palaikymą, paramą ir kantrybę rengiant disertaciją, autorius išreiškia nuoširdžią padėką savo tėvams Editai ir Kęstučiui, broliui Giedriui, o labiausiai – savo žmonai Aušrai ir vaikams Emai bei Faustui.

Lengvojo betono elementų fizikinių modelių ir analizės metodų apžvalga

Skyriuje pateikiama trumpa lengvojo betono vystymosi istorinė apžvalga, aptariami lengvojo betono mišiniams naudojami užpildai ir jų klasifikacija, lengvojo betono mišinių fizikinės, technologinės ir mechaninės savybės, armuoto lengvojo betono fizikiniai modeliai, laikomosios galios ir deformacijų apskaičiavimo analitiniai bei skaitiniai metodai. Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Rumšys *et al.* 2017a, 2017b, 2018).

1.1. Poreikio pagrindimas, privalumai ir trūkumai bei istorinė apžvalga

Per beveik 150 metų vystymosi laikotarpį armuotas betonas tapo plačiausiai taikoma konstrukcine medžiaga, kurios išskirtinumą lemia plačios naudojimo galimybės, mažos eksploatacinės išlaidos, palyginti ilga naudojimo trukmė bei nedidelė kaina. Šiuolaikiniame pasaulyje betonas tapo antrąją (po vandens) žmonijos labiausiai naudojama medžiaga – per metus pasaulyje vienam gyventojui vidutiniškai tenka po 3 tonas betono. Palyginti su kitomis medžiagomis (plienu, mediena, plastikų, aliuminiu), betono gamybos apimtis yra dvigubai didesnė nei kitų

tradicinių statybinių medžiagų kartu sudėjus. Prognozuojama, kad iki 2050 m. betono gamyba pasaulyje gali siekti maždaug 28 mlrd. tonų per metus ir keturis kartus viršyti 1990 m. lygį. Vis dėlto dėl nemažo gelžbetoninių konstrukcijų savojo svorio smarkiai išauga šių konstrukcijų nuolatinė apkrova, o tai savo ruožtu lemia didesnes statybos išlaidas. Ši tendencija visame pasaulyje paskatino inovatyvių armuoto betono konstrukcinių sprendinių paiešką. Šiuolaikinėje statybos pramonėje šalia įprastų normalaus stiprio betonų naudojami lengvieji betonai (LB), kurių tūrinis svoris gali būti net iki 40 % mažesnis. Konstrukcinio lengvojo betono mišiniui pagaminti greta sunkaus užpildo (smėlio, žvyro, skaldos) naudojami natūralūs arba dirbtiniai lengvieji užpildai. Dirbtiniai užpildai apima ir antrines žaliavas, kurių naudojimas betono mišiniams pastaruoju metu ypač suintensyvėjo (Alqahtani *et al.* 2017). Konstrukcinio lengvojo betono naudojimas statiniams turi daug privalumų: mažesnis reikalingos armatūros kiekis, mažesni elementų skerspjūviai, galimybė statyti didesnio aukščio pastatus ir mažesnės medžiagų sąnaudos pamatams įrengti (Tanyildizi ir Coskun, 2008; Gunduz ir Ugur 2005). Šios tendencijos leidžia sumažinti ir bendrą statinio kainą. Lengvojo betono naudojimas vietoj normaliojo betono gali pagerinti konstrukcinį statinių naudingumą. Lengvasis betonas turi geresnes šilumos ir garso izoliacines savybes nei normalusis, todėl pastatuose, pastatytuose iš lengvojo betono, eksploatacijos metu labai sumažėja energijos suvartojimo mastas (Shafigh *et al.* 2018; Akeiber *et al.* 2016). Real *et al.* (2016) nustatė, kad jeigu pastatai Europoje būtų pastatyti panaudojant lengvąjį, o ne normalųjį betoną, šilumos energijos būtų suvartojama 15 proc. mažiau. Be minėtų privalumų, palyginti su normaliaisiais betonais, lengvasis betonas pasižymi geresnėmis ilgaamžiškumo savybėmis (didesnis atsparumas šalčiui ir kt.), didesniu atsparumu gaisrui ir seisminėms apkrovoms. Tai lėmė, kad daugelyje pasaulio šalių lengvasis betonas plačiai naudojamas didelio tarpatramio tiltų perdangų (Harmon 2004) bei daugiaaukščių pastatų konstrukcijoms statyti (Demirdag ir Gunduz 2008).

Nepaisant didelės tiek teorinių, tiek eksperimentinių tyrimų apimties visame pasaulyje, kai kurie autoriai pažymi (Koh *et al.* 2008), kad su lengvojo betono fizikiniu modeliavimu susiję tyrimai iki šiol nėra pakankami. Šios tendencijos yra susijusios su daugybe inovatyvių medžiagų (priedai, užpildai ir kt.) naudojimu betono mišinių gamybai, kurios savo ruožtu lemia betono fizikinių ir mechaninių savybių kaitą. Vienas esminių betoninių konstrukcijų trūkumų yra jo pleišėjimas, kurį lemia mažas betono tempiamasis stipris. Didelio pločio plyšiai yra pagrindinė plieninės armatūros korozijos priežastis, mažinanti konstrukcijų ilgaamžiškumą (Kaklauskas 2017; Vanagas *et al.* 2017; Vidal *et al.* 2004). Dėl prastesnių mechaninių savybių (lyginant su normaliuoju betonu) armuotų LB elementų pleišėjimo problema tampa dar aktualesnė. Kitų autorių (Sin *et al.* 2011; Walraven *et al.* 1995) atlikti tyrimai rodo, kad priėmus atitinkamas mechanines charakteristikas lengvojo betono tinkamumo ribinio būvio analizei gali būti taikomi tie patys

metodai kaip ir normaliajam betonui. Vis dėlto Dias-da-Costa *et al.* (2014) atlikta plačios apimties parametrinė analizė atskleidė, kad, taikant Europos projektavimo normų LST EN 1992-1-1:2005 (EC2) plyšio pločio ir vidutinių deformacijų apskaičiavimo algoritmus, gaunamos per mažos šių parametų reikšmės. Tokie pat rezultatai gauti ir JAV normų (Sin *et al.* 2011) metodu. Carmo ir Dias-da-Costa (2015) modifikavo euronormų (EC2) vidutinių deformacijų apskaičiavimo metodiką, kurią taikant lenkiamųjų ir tempiamųjų elementų skaičiavimo rezultatai pagerėjo atitinkamai 10 % ir 15 %. Fundamentiniu požiūriu, kai kuriuose darbuose (Gilbert 2007) atskleidžiama mažai armuotų lengvojo betono elementų (pvz., plokščių) tyrimų svarba. Šių elementų supleišėjusiuose ruožuose skerspjūvio standumas yra daug kartų mažesnis nei nesupleišėjusio skerspjūvio. Tokiu būdu tempiamojo betono įtaka elemento deformacijoms tampa ypač svarbi, o taikomi tradiciniai normų metodai dažniausiai neužtikrina rezultatų patikimumo (Gribniak *et al.* 2013a).

Kitas svarbus gelžbetoninių elementų deformacijų analizės aspektas – susitraukimo deformacijų vertinimas stadijoje iki apkrovimo. Gerai žinoma, kad dėl mišinio sudėties bei gamybos technologijos kaitos tradicinių betonų susitraukimo deformacijos gali išaugti iki penkių kartų (Gribniak *et al.* 2013b). Panašios tendencijos galioja ir LB atveju. Lengvojo užpildo paruošimas (dažniausiai drėkinimas), vandens kiekis mišinyje, lengvojo užpildo proporcijos gali lemti dideles lengvojo betono mišinių susitraukimo deformacijas tiek iki apkrovimo, tiek eksploatacijos stadijoje. Dėl lengvojo betono mišinio mažesnio tamprumo modulio ir didesnių susitraukimo deformacijų, lyginant su normaliuoju betonu, betonas gali supleišėti dar iki apkrovimo.

Lengvojo betono privalumai ir trūkumai, lyginant su normaliuoju betonu

Privalumai:

- mažesnis konstrukcijų savasis svoris, o tai lemia elementų skerspjūvių matmenų sumažėjimą; dėl mažesnės nuolatinės apkrovos mažesnis reikalingos armatūros kiekis;
- efektyvesnis stiprio ir svorio santykis;
- mažesnis šilumos laidumo koeficientas;
- vienodas ar geresnis šalčio atsparumas;
- geresnis ugnies atsparumas;
- geresnės garso izoliavimo savybės;
- medžiaga atsparesnė seisminių apkrovų poveikiams;
- medžiagoms transportuoti reikia mažiau išlaidų.

Trūkumai:

- mažesnis stipris;
- mažesnė tamprumo modulio reikšmė;
- didesnė valkšnumo ir susitraukimo deformacijos;

- didesnis trapumas;
- medžiagos savybės labai priklauso nuo vandens kiekio mišinyje;
- mišinys jautresnis išsiskuoksniavimui gamybos metu;
- norint pasiekti vienodą stiprį kaip normaliojo betono, reikia naudoti didesnius cemento, mikroužpildų ar priedų kiekius;
- kyla problemų formuojant elementus, kai betono mišiniai paduodami siurbliais.

Lengvojo betono istorinė apžvalga

Lengvasis betonas – ne nauja medžiaga. Natūralus vulkaninės kilmės lengvojo betono užpildas, toks kaip pemza ir šlakas, buvo žinomas ir naudojamas graikų ir romėnų dar prieš mūsų erą. Įspūdingi senoviniai statiniai, tokie kaip Koliziejus ir Panteonas Romoje ar Sofijos soboras Stambule, buvo pastatyti naudojant lengvojo betono elementus arkinėms ir skliautinėms konstrukcijoms (EuroLightCon 1998). Vėliau, iki pat XX a., konstrukcinis lengvasis betonas nebuvo plačiai naudojamas. Tik XX a. pirmoje pusėje jį vėl imta naudoti statybos pramonėje.

LB gamybos technologijos tobulėjimas leido išgauti keramzitą sukamojoje degimo krosnyje. Tokiu būdu išgauti lengvieji užpildai buvo pritaikyti laivų korpusų statybai Pirmojo pasaulinio karo metu. Žymiausias laivas, pastatytas Jungtinėje Amerikos Valstijose (JAV), pavadintas *U.S.S. Selma* vardu ir pradėtas eksploatuoti 1919 m (Expanded Shale Clay and Slate Institute 1967).

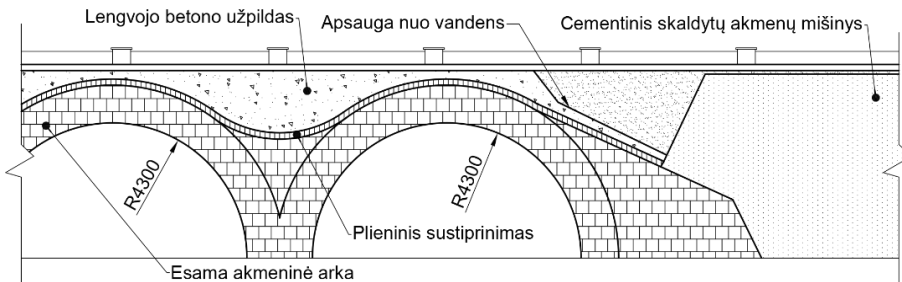
Pirmasis didelis projektas panaudojant konstrukcinį LB pradėtas 1928–1929 m., kai Kanzaso mieste įsikūrusi telefonų kompanija „Southwestern Bell“ panoro paaukštinti savo pastatą aštuoniais papildomais aukštais, naudodama įprasto svorio betoną. Atlikdami skaičiavimus, ekspertai pastebėjo, kad, pasirinkus LB mišinį su pūsto skalūno užpildu, pastatą būtų galima saugiai paaukštinti papildomais keturiolika aukštų, t. y. pastato aukštį padidinti dvigubai – iš 14 pastatas tapo 28 aukštų dangoraižiu. Iš viso pastato savasis svoris sumažėjo apie 4000 t, lyginant su pastato svoriu, jei būtų buvęs panaudotas normalusis betonas. LB kubinis gniuždymo stipris po 28 parų kietėjimo siekė 24 MPa, o tuo laikotarpiu tai buvo labai aukštas rodiklis. Naujo pastato laikančiosioms konstrukcijoms LB pirmą kartą panaudotas 1929 m. statant 28 aukštų viešbutį „Park Plaza“ Sent Luiso mieste (JAV).

1936 m. LB pirmą kartą panaudotas tiltų statyboje statant „Oakland Bay“ tiltą San Fransiske (JAV). LB panaudotas viršutinei standumo sijos daliai. Tai leido 1,2 kPa sumažinti nuolatinę apkrovą, kuri sudarė 15 800 t visam statiniui. LB leido sumažinti elementų dydį, tiesioginę apkrovą, tenkančią pamatams, taip pat pastato kainą. Bendras statinio kainos sumažėjimas įvertinamas 3 milijonais JAV dolerių.

Antrojo pasaulinio karo metu JAV taip pat buvo pastatyta daugiau nei 100 karinių 3000–140 000 t svorio laivų, kuriems panaudotas LB. Sėkminga šių laivų

eksploatacija tuo metu paskatino platesnį konstrukcinio LB naudojimą pastatų ir tiltų statyboje (EuroLightCon 1998).

Konstrukcinio LB naudojimas tiltų statyboje gerokai išaugo XX a. šeštajame dešimtmetyje. Armuoto LB perdangos panaudotos Benicia-Martinez tiltui San Fransiske (JAV), tiltui virš Napa upės Kalifornijoje (JAV), Dyckerhoffo pėsčiųjų tiltui (Vokietija), Hermannswego tiltui (Vokietija), Raftsundo ir Stolma tiltui (Norvegija), tiltui virš Abavos upės, viadukui virš A1 kelio (Latvija) ir daugeliui kitų statinių. Iš šių tiltų galima išskirti du ilgiausius pasaulyje gelžbetoninius gembinius Raftsundo ir Stolma tiltus, kurių tarpatramiai siekia apie 300 m.



1.1 pav. Arkinio tilto virš upės Abava išilginis pjūvis
(pagal Paeglitis ir Sahmenko 2006)

Fig. 1.1. Longitudinal section of arch bridge over Abava river
(according to Paeglitis, Sahmenko 2006)

Šiuolaikinio LB naudojimo gerosios praktikos pavyzdžių toli ieškoti nereikia. Kaimyninėje Latvijoje LB mišiniai panaudoti rekonstruojant mūrinius arkinis tiltus per Abavos upę Kandavoje (1.1 pav.) ir per Ventos upę Kuldygoje. Per abiejų tiltų rekonstrukciją sustiprinta arkinė perdanga, išsaugant istorinę tilto išvaizdą. Rekonstruojant arkų viduje esantis smėlio užpildas pakeistas LB, kurio klasė LC16/18, o tankis 1730 kg/m^3 . Šio betono naudojimas sumažino tilto perdangos savąjį svorį ir leido išvengti tilto pamatų stiprinimo (Paeglitis ir Sahmenko 2006). Taip pat galima paminėti viaduką A2 kelyje. Vantinės sistemos statinyje panaudota trijų tarpatramių nekarpyta perdangos plokštė iš LB, kurio charakteristinis gniuždomasis stipris siekė 45 MPa, o tankis – apie 1950 kg/m^3 (Paeglitis ir Sahmenko 2006).

Konstrukcinio lengvojo betono tyrimai Lietuvoje

Lietuvoje lengvasis betonas daugiausia nagrinėtas kaip termoizoliacinė / atitvarinė medžiaga (Laukaitis *et al.* 2005; Kligys 2007), nepasižyminti dideliu gniuždomuoju stipriu. Anksčiau didelis dėmesys buvo skiriamas keramzitbartonio plokščių tyrimams, kurios sovietmečiu plačiai buvo naudojamos daugiabučių išorinėms sienoms. Tačiau šis betonas su keramzito užpildu neatitinka dabar

konstrukciniam LB keliamų stiprumo reikalavimų (gniuždomasis stipris ne mažesnis kaip 17 MPa, tankis ne didesnis kaip 2000 kg/m³). Vaičienė (2011) sukūrė ir užpatentavo LB mišinį su keramzito užpildu, kurio gniuždomasis stipris siekė 18,5 MPa, o tankis – iki 1400 kg/m³. Tai patenka į konstrukcinio LB sąvoką, tačiau pagal stiprį yra labai arti žemutinės ribos (17 MPa). J. Valivonis (Olmedo-Zazo *et al.* 2018) tyrinėjo daugiasluoksnės sijos pagamintas iš lengvojo ir normaliojo betono. Šiose sijose, nedidelio stiprio (3–5 MPa) LB buvo naudojamas kaip vidurinis sijos sluoksnis. Reikia išskirti Janavičiaus *et al.* (2008) darbą, kuriame buvo sukurtas 37,5 MPa gniuždomojo stiprio ir 1780 kg/m³ tankio LB, panaudotas P. Vileišio tilto per Nerį Kaune šaltilčių plokštėms.

1.2. Lengvojo betono užpildai ir jų klasifikacija

Esminė lengvųjų užpildų savybė – didelis poringumas. Tai sumažina medžiagos savitąjį tankį. Kai kurie lengvieji užpildai atsiranda natūraliai, kiti pagaminti iš natūralių medžiagų arba perdirbant pramonės antrinius produktus (Neville 2011).

Vadovaujantis LST EN 13055:2016 standartu, lengvasis užpildas – tai mineralinė granuliuotoji medžiaga, kurios dalelių tankis neviršija 2000 kg/m³ arba kurios piltnis tankis neviršija 1200 kg/m³. Lengvieji užpildai gali būti suskirstyti į 4 grupes:

1. Natūralieji (gamtiniai) užpildai – iš mineralinių išteklių pagaminti užpildai, kurie apdorojami tik mechaniškai (pemza, vulkaninės kilmės šlako nuolaužos, tufas).
2. Iš natūralių (gamtinių) medžiagų pagaminti užpildai – mineraliniai užpildai, gaunami pramoniniu būdu termiškai apdorojant ar kitaip modifikuojant (keramzitas, akytasis skalūnas, akytasis filitas, akytasis perlitas, akytasis vermikulitas).
3. Užpildai iš pramoninių procesų šalutinių produktų (mineraliniai užpildai, kurie gaunami pramoniniu būdu ir vėliau tik mechaniškai apdorojami) ar pagaminti iš perdirbtos pirminės medžiagos (užpildai, gauti apdorojant anksčiau statyboje naudotą neorganinę ar mineralinę medžiagą). Tokiems užpildams priskiriami sukepinti lakieji pelenai, šaltuoju būdu surišti lakieji pelenai, aukštakrosnių šlakas (iš geležies ir plieno gamybos), akytasis pūstas stiklas, pūstas stiklas.
4. Užpildai, kurie pagaminti naudojant antrinius pramoninių procesų produktus, pvz., anglimi kūrenamų katilų pelenai, aukštakrosnių klinkeris, nuosėdiniai pelenai, lakieji pelenai ir kt.

Šiais laikais didelis dėmesys skiriamas užpildams, pagamintiems iš perdirbtų atliekų, t. y. plėtojant beatliekės gamybos koncepciją (angl. *zero waste*). Betono užpildų paklausa Europoje siekia 3 bilijonus tonų per metus, o jų vertė siekia apie 20 bilijonų eurų. Daugiausia, apie 90 %, užpildų gaminami iš natūralių žaliavų. Likusieji 10 % susideda iš perdirbtų užpildų (6 %) ir jūrinių bei dirbtinai pagamintų užpildų (4 %). Naudojant atliekines medžiagas kaip užpildus betono mišiniams, labai sumažinamas gamtinių išteklių žemėje naudojimo intensyvumas (Saikia ir Brito 2013). Lengvojo užpildo gamybai (keramzitui) gali būti panaudotos statybvietėse likusios molio atliekos (Ayati *et al.* 2018). Taip pat užpildai gali būti gaminami iš plastiko atliekų, stiklo duženų, aliejinių palmių kevalų, dugno pelenų, sukepintų ar surištų lakiųjų pelenų ir pan. Šioje srityje galima paminėti Senhadji *et al.* (2015), Kumar ir Baskar (2015), Siddique *et al.* (2008), Jo *et al.* (2008), Choi *et al.* (2005, 2009), Ismail ir Hashmi (2008), Babu ir Babu (2003), Wu ir Sun (2007) darbus, susijusius su betono užpildu iš plastiko atliekų; Nemes (2006), Petrella *et al.* (2007), Al-Sibahy (2012), Yu *et al.* (2013), Spiesz *et al.* (2013), Yu *et al.* (2016), darbus, susijusius su užpildu iš stiklo atliekų; Teo *et al.* (2006), Shafigh *et al.* (2010, 2011a), Alengarem *et al.* (2013) darbus, susijusius su aliejinių palmių kevalų užpildu; Cheeseman *et al.* (2005), Bai *et al.* (2004), Qiao *et al.* (2008), Zhang ir Poon (2015) darbus, susijusius su dugno pelenų (šlakų) užpildu; Wasserman ir Bentur (1997), Kayali (2008), Sivakumar ir Gomathi (2012), Kockal ir Ozturan (2010) darbus, susijusius su sukepintų ar surištų lakiųjų pelenų užpildu. Kai kurie LB gamyboje naudojami užpildai (pemza, pūstas skalūnas, keramzitas, pūstas stiklas, pūstas polistirenas, aliejinių palmių kevalai, perdirbtas plastikas, sukepinti lakieji pelenai) pateikti 1.2 paveiksle.

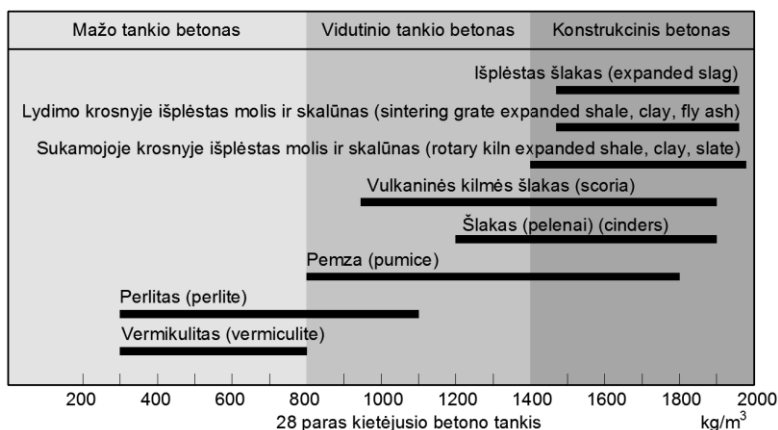


1.2 pav. Įvairių tipų užpildai naudojami lengvojo betono gamyboje
Fig. 1.2. Different types of aggregates for production of lightweight concrete

Vadovaujantis LST EN 206:2013, lengvasis betonas atitinka mišinius, kurių, išdžiovintų džiovkloje, tankis yra ne mažesnis kaip 800 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 2000 kg/m^3 . Šis betonas skirstomas į klases pagal gniuždomąjį stiprį (nuo LC8/9 iki LC80/88) ir betono tankį (nuo D1,0 iki D2,0 klases). EC2 reglamentuojama žemiausia konstrukcinio LB klasė yra LC12/13, o mišinio vidutinis gniuždomasis stipris – 17 MPa. JAV projektavimo normų standarte ACI 318:2014 (ACI) LB apibūdinamas kaip betonas, kurio sudėtyje yra lengvasis užpildas, jo pusiausvirasis tankis (angl. *equilibrium density*) – $1400\text{--}1840 \text{ kg/m}^3$. JAV lengvojo betono rekomendacijose ACI 213R (2014) LB priskirtas mišiniams, kurių tankio intervalas $1120\text{--}1920 \text{ kg/m}^3$. Ten taip pat pabrėžta, kad LB, kurio tankis $1120\text{--}1680 \text{ kg/m}^3$, retai naudojamas laikančiosioms konstrukcijoms. Panašios tendencijos minimos ir kituose šaltiniuose (Neville 2011; El-Reedy 2016). Taip pat kaip ir EC2 normose, JAV standarte (ACI) konstrukciniam betonui priskiriamas betonas, kurio vidutinis gniuždomasis stipris yra $\geq 17 \text{ MPa}$.

Naujokaitis (2007) LB pagal tankį klasifikavo į šias grupes:

1. Labai lengvi termoizoliaciniai betonai, kurių tankis išdžiovinus iki 500 kg/m^3 . Šių betonų stiprumas paprastai neviršija 1,5 MPa;
2. Lengvieji betonai, kurių išdžiovintas tankis ne mažesnis kaip 800 kg/m^3 ir ne didesnis kaip 2000 kg/m^3 . Dar gali būti suskirstyti į konstrukcinius-termoizoliacinius ($\rho = 800\text{--}1400 \text{ kg/m}^3$) ir konstrukcinius ($\rho = 1400\text{--}2000 \text{ kg/m}^3$);
3. Lengvuosius betonus, kurių skiedinys porizuotas ($\rho = 800\text{--}1200 \text{ kg/m}^3$).



1.3 pav. Lengvojo betono užpildo klasifikavimas pagal betono tankį (pagal Paeglitis ir Sahmenko 2006)

Fig. 1.3. Classification of lightweight aggregate by concrete density (according to Paeglitis and Sahmenko 2006)

Pagal struktūrą LB skirstomas į (Naujokaitis 2007):

1. Tankiuosius, kurių gamybai taikomas poringas užpildas yra tankiojo skiedinio sudėtyje. Cementinis skiedinys užpildo visas tuštumas tarp stambiųjų užpildų dalelių;
2. Putų ir dujų, kai skiedinys porizuojamas naudojant medžiagas, sukeliančias putas ar dujas, kurios įstringa betono mišinyje;
3. Be smulkių užpildų, kai cementinis skiedinys ne iki galo užpildo tuštumas tarp stambiojo užpildo grūdėlių.

Apibendrintai LB klasifikacija pagal jo tankį pateikta 1.3 paveiksle. Kaip minėta, ne visi užpildai tinkami konstrukcinio LB mišinių gamybai. Konstrukcinio LB gamybai dažniausiai naudojami keramzitas, skalūnai, lakieji pelenai ir aukštakrosnių šlakas (Mehta ir Monteiro 2006).

1.3. Lengvojo betono fizikinės, technologinės ir mechaninės savybės

Apibendrintai, betono mišiniai dažniausiai apibūdinami trimis pagrindinėmis savybėmis arba jų grupėmis: klojumas (technologiskumas (angl. *workability*)), gniuždomasis stipris ir ilgaamžiškumas. Gniuždomasis stipris ir ilgaamžiškumas priklauso nuo sukietėjusio betono savybių, o klojumas nuo šviežio betono savybių. Savo ruožtu sukietėjusio betono savybės taip pat priklauso nuo mišinio sudėties ir šviežio betono savybių (Vakhshouri ir Nejadi 2016; Domone 2006). Lyginant su normaliuoju betonu, LB pasižymi mažesniu tankiu, didesnėmis susitraukimo ir valkšnumo deformacijomis, geresniu atsparumu šalčiui ir ugniai, sudėtingesniu klojumu, mažesniu mechaniniu atsparumu, mažesniu tamprumo moduliui ir didesniu trapumu.

1.3.1. Fizikinės savybės

Tankis

Lengvojo betono pavadinimas asocijuojasi su mažesniu tankiu, palyginti su normaliuoju betonu. Praktiniu požiūriu siekiama, kad LB tankis būtų kuo mažesnis, esant kuo didesniam betono stipriui. Betono tūrio svoriui apibūdinti taikomos trys tankio rūšys: šviežio betono tankis (angl. *fresh density*) – tai tankis, nustatytas betono mišiniui iš karto po sumaišymo; ore kietėjusio betono tankis (angl. *air-dry density*) – tai natūraliomis aplinkos sąlygomis kietėjusio mišinio tankis, nustatomas, kai mišinyje esanti drėgmė nebekinta; krosnyje džiovinto mišinio tankis (angl. *oven-dry density*) – tai tankis, nustatytas išdžiovinus bandinį 105 °C temperatūroje iki pastovios masės. Apibūdinant LB būtina išskirti tankio rūšį, nes,

lyginant su normaliuoju betonu, skirtingi LB tankiai gali smarkiai skirtis tarpusavyje (Neville 2011).

Ivairiuose standartuose reglamentuotos LB tankio ribos aptartos 1.2 poskyryje. Šiame skirsnyje, 1.1 lentelėje pateiktos EC2 standarte reglamentuotos išdžiovinto krosnyje mišinio tankio klasės. Šioje lentelėje pateiktos atitinkamos nearmuotojo ir armuotojo betono skaičiuotinės tankio vertės.

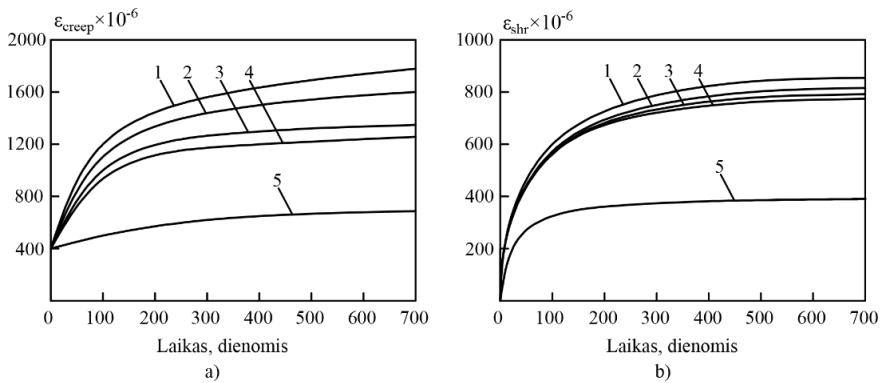
1.1 lentelė. Tankio klasės ir atitinkamas skaičiuotinis lengvojo betono tankis (EC2)
Table 1.1. Density classes and corresponding design densities of lightweight concrete (EC2)

Tankio klasė		1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0
Tankis, kg/m ³		800–1000	1000–1200	1200–1400	1400–1600	1600–1800	1800–2000
Skaičiuotinis tankis, kg/m ³	Nearmuotas betonas	1050	1250	1450	1650	1850	2050
	Gelžbetonis	1150	1350	1550	1750	1950	2150

Susitraukimas ir valkšnumas

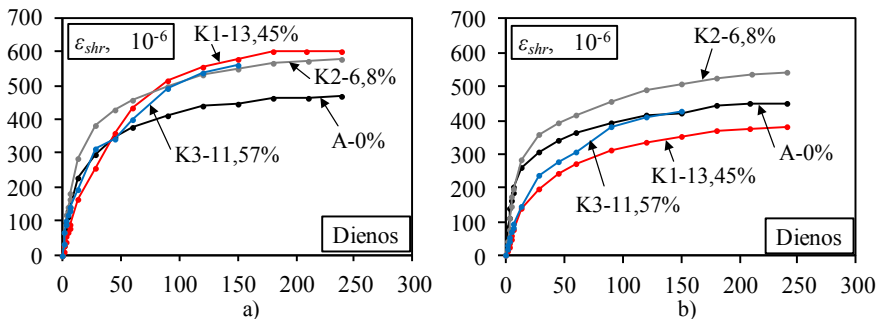
Lyginant su normaliuoju betonu, lengvojo betono struktūroje drėgmė migruoja lengviau. Ši tendencija lemia didesnes ribines susitraukimo (apie $8 \cdot 10^{-4}$) ir daug didesnes valkšnumo (apie $16 \cdot 10^{-4}$) deformacijas. Tai rodo, kad mažo stiprio ir mažo tamprumo modulio betoną labiau veikia valkšnumo deformacija negu susitraukimas betonui kietėjant (Mehta ir Monteiro 2006).

Betono supleišėjimas ankstyvu laikotarpiu po užbetonavimo yra vienas iš pagrindinių betono trūkumų. Šį efektą sukelia temperatūriniai poveikiai ir savaiminis betono džiūvimas (Bentz ir Snyder 1999; Golias *et al.* 2012; Cusson ir Hoo-geveen 2008). Ankstyvojo pleišėjimo efektas sustiprėja esant mažam vandens / cemento santykiui (V/C) ir didesniai cemento kiekiui. Tai būdinga didelio stiprio LB mišiniams (Wang *et al.* 2017). Norint išvengti arba sumažinti ankstyvojo pleišėjimo riziką, būtina užtikrinti, kad mišinio vidinė santykinė drėgmė greitai nesumažėtų. Pleišėjimo prevencijai, betoną, ypač pradinėmis kietėjimo dienomis, rekomenduotina drėkinti išoriškai. Tačiau dėl tankios betono matricos mišinio struktūros, drėgmė į betono vidų skverbiasi lėtai ir tik į ribotą gylį (Shen *et al.* 2015). Iš anksto sudrėkintas lengvasis užpildas betone sukelia vidinį drėkinimą (angl. *internal curing*), o tai sumažina betono ankstyvojo pleišėjimo riziką (Ji *et al.* 2015; Wang *et al.* 2017), pagerina porinę medžiagos struktūrą (Zhutovsky ir Kovler 2012; Bentz ir Weiss 2011). Vidinis drėkinimas mažina ir susitraukimo deformacijas bei valkšnumą (Zhang 1995). Drėgmės migracija iš lengvojo užpildo į cementinį akmenį taip pat sustiprina cementinės matricos ir lengvojo užpildo sąlyčio zoną (Golias *et al.* 2012).



1.4 pav. Lengvojo betono smulkiųjų lengvųjų užpildų pakeitimo natūraliu smėliu poveikis (pagal Orchard *et al.* 1979): a) santykinė valkšnumo deformacija; b) santykinė susitraukimo deformacija (1 – be pakeitimo, 2 – 1/3 pakeista, 3 – 2/3 pakeista, 4 – 100 % pakeista, 5 – normalusis C35/45 betonas)

Fig. 1.4. Effect for lightweight concrete of replacing lightweight fine aggregates with natural sand (according to Orchard *et al.* 1979): a) relative creep strain; b) relative shrinkage strain (1 – without replacement, 2 – 1/3 replaced, 3 – 2/3 replaced, 4 – 100 % replaced, 5 – C35/45 ordinary concrete)



1.5 pav. Wang *et al.* (2017) paskelbti susitraukimo grafikai: a) mišiniai su skirtingo tipo iš anksto drėkintu keramzitu ir akmens užpildu b) mišiniai su skirtingo tipo iš anksto drėkintu keramzitu ir akmens užpildu bei 10 % cemento masės pakeistu į plėtimosi agentą

Fig. 1.5. Shrinkage graphs reported by Wang *et al.* (2017): a) Mixtures with different types of pre-wetted expanded clay and stone aggregates; b) Mixtures with different types of pre-wetted expanded clay and stone aggregates and 10 % cement mass replaced with expansion agent

Smulkiojo lengvojo užpildo pakeitimo į paprastą smėlį efektas valkšnumo ir susitraukimo deformacijai pavaizduotas 1.4 paveiksle (pagal Orchard *et al.* 1979).

Papildomai atidėtas normaliojo C35/45 betono susitraukimo deformacijų kitimo grafikas apskaičiuotas teoriškai pagal EC2 (imta 70 % santykinė drėgmė ir *N* klasės cementas). Iš paveikslų matyti, kad kuo daugiau betone lengvųjų užpildų, tuo valkšnumo ir susitraukimo deformacijos yra didesnės. Normaliojo betono valkšnumo deformacijos gali būti daugiau nei tris kartus, o susitraukimo – daugiau nei perpus mažesnės.

Būtina pabrėžti, kad 1.4 paveiksle pateikti gana seniai atliktų tyrimų duomenys. Pastaraisiais dešimtmečiais betono mišinių gamybai naudojamos medžiagos bei priedai betonui yra kokybiškesnės, leidžiančios pagerinti betono savybes. Wang *et al.* (2017) tyrinėjo iš anksto sudrėkinto lengvojo užpildo (trys skirtingi keramzito užpildai) poveikį susitraukimo deformacijoms ir lygino jas su betonu, kurio sudėtyje buvo įprastas akmens (autoriai nepateikė tikslesnio užpildo apibūdinimo) užpildas (mišinio proporcijos išlaikytos vienodos). Prieš formuojant bandinius, keramzito užpildas buvo drėkintas 24 valandas. Skirtingo tipo keramzito užpildų įmirkis buvo nevienodas (1.5 pav.). K1 pažymėtas keramzitas įmirko 13,45 % nuo keramzito masės, K2 ir K3 – atitinkamai 6,8 % ir 11,57 %, o betonas su akmens užpildu A nebuvo drėkintas, todėl žymimas 0 %. 1.5 b paveiksle pavaizduotiems mišiniams 10 % cemento masės papildomai pakeista plėtimosi agentais (juos taip pat naudojo Han *et al.* 2016; Saito *et al.* 1991) bei stebėtas jų poveikis susitraukimo deformacijoms. Iš 1.5 a paveikslų pateiktų grafikų matyti, kad lengvųjų betonų susitraukimo deformacijos didesnės už normaliojo betono, tačiau nėra tokios didelės kaip ankstesniame 1.4 b paveiksle. Tai vidinio drėkinimo pasekmė. Nagrinėjant 1.5 b paveikslą, galima pastebėti, kad, naudojant plėtimosi agentą, kai kuriems lengvųjų betonų mišiniams, lyginant su normaliaisiais betonais, gautos mažesnės susitraukimo deformacijų reikšmės. Taigi iš anksto užpildus drėkinant ir naudojant papildomus priedus, LB susitraukimo deformacijos gali būti smarkiai sumažinamos ir savo reikšmėmis priartinamos prie normaliojo betono susitraukimo dydžio.

Ilgamžiškumas

Lengvojo betono atsparumas užšalimo / atšilimo ciklams yra panašus ar net geresnis, lyginant su įprasto svorio betonais (Holm 1994; Hammer ir Smeplass 1995; Mehta ir Monteiro 2006). Tačiau jeigu lengvasis užpildas, prieš maišant betoną, buvo iš anksto drėkintas, atsiranda atsparumo šalčiui sumažėjimo rizika, kurią lemia dėl neigiamosios temperatūros užpilde besiplečiantis vanduo. Šios rizikos galima išvengti užtikrinant, kad lengvasis užpildas prieš šalčio poveikį spėtų išdžiūti (ACI 201.2R-01).

LB poros viena su kita nesijungia ir nesudaro sistemos. Dėl šios priežasties atskirų užpildų poros neturi įtakos betono vandens pralaidumui. Ši savybė labai priklauso nuo sukietėjusio mišinio matricos (Zhang ir Gjorv 1991b). Betono pralaidumas vandeniui gali būti sumažintas, vietoj lengvojo smulkaus užpildo

naudojant įprastą užpildą (Zhang ir Gjorv 1991b). Mažą LB pralaidumą vandeniui lemia keletas priežasčių: mažas V/C santykis, dėl labai geros sąlyčio zonos tarp užpildo ir cementinės matricos vandens pratekėjimas šioje zonoje nepasireiškia, dėl panašesnių užpildo ir cementinės matricos tamprumo modulių reikšmių, veikiant apkrovai ar kintant temperatūrai, susidaro tik nedideli mikroplyšiai, lengvasis užpildas po betonavimo dar kurį laiką atiduoda drėgmę, leidžiančią cementui pasiekti geresnį hidratacijos laipsnį (Neville 2012). Haque ir Khaiat (1999), Haque *et al.* (2004) nustatė, kad vandens pralaidumo savybėms įtakos taip pat turi pradinis išorinis betono drėkinimo laikas. Šiuose šaltiniuose nurodoma, kad, esant didesniai vandens pralaidumui, kenksmingos medžiagos, tokios kaip anglies dioksidas, sulfatai ir chloridai, lengviau prasiskverbia į betoną. Holm *et al.* (1984) konstatavo, kad betono pavyzdžiuose, paimtuose iš 5,2 km ilgio LB pakloto (20 metų senumo), pastebėti maži mikroplyšių požymiai, o betono su kvarcinio žvirgždo užpildu bandiniai, paimti iš tos pačios aplinkos ir esantys tokio pat senumo, buvo su didesniais plyšiais. Holm (1980) paėmė LB bandinius iš Pirmajame pasauliniame kare naudoto laivo *USS Selma*, kuris 60 metų buvo eksploatuojamas jūrinėje aplinkoje. Šiame betone pastebėti tik keli mikroplyšiai. Minėti du pavyzdžiai patvirtina LB mažą pralaidumą vandeniui ir gerą atsparumą šalčiui.

Lengvieji užpildai yra poringi ir, lyginant su normalaus svorio uolienomis ir mineralais, silpnesni ir trapesni. Dėl šios priežasties betonas, sudarytas iš lengvųjų užpildų, turi blogų dilumo savybių. Smulkiojo lengvojo užpildo pakeitimas natūraliu smėliu pagerina atsparumą susidėvimui (Mehta ir Monteiro 2006).

Atsparumas ugniai

LB atsparumas ugniai yra geresnis, lyginant su normaliuoju betonu dėl žemesnio šiluminio laidumo, mažesnio temperatūrinio plėtimosi koeficiento ir užpildo stabilumo ugnyje (ACI 213R 2014; Mehta ir Monteiro 2006; Neville 2011; Bingol ir Gul 2004; Go *et al.* 2012).

Go *et al.* (2012) paskelbė savo tyrimų rezultatus apie sienų, pagamintų iš LB atsparumą ugniai. Autoriai gautus rezultatus lygino su normaliuoju panašaus stiprio betonu. Sienų bandiniai buvo kaitinami iš vienos pusės 1 val. pagal standartinę ugnies kreivę taip, kad bandinių vidus per pirmąsias 10 minučių įkaistų iki 700 °C, o per kitas 50 min. – iki 950 °C. Po kaitinimo bandymo sienos buvo išbandytos horizontalia išilgine apkrova iki suirimo. Bandymai parodė, kad LB sienų pleišėjimo apkrova išlieka 93,6 %, lyginant su bandiniu prieš kaitinimą, armatūros tekėjimo apkrova – 94,1 %, atlaikomoji apkrova – 95,8 %. NB sienų šie procentai buvo atitinkamai 76,3 % – pleišėjimo apkrovai, 78,3 % – armatūros tekėjimo apkrovai ir 72,5 % – atlaikomajai jėgai. Tyrinėjant sienų standumą (tyrimuose imtas santykis tarp apkrovos, kuriai esant pasiekama armatūros takumo riba, ir šiai apkrovai atitinkamo horizontalaus poslinkio) ir plastiškumą (tyrimuose imtas santykis tarp poslinkio esant takumo ribai ir poslinkio esant stiprio ribai), nustatyta, kad

LB sienos po kaitinimo išlaikė 85,4 % savo standumo ir 99,6 % plastiškumo. NB šios vertės atitinkamai buvo 74,8 % ir 81,0 %. Visais tyrinėjtais aspektais dėl ugnies atsparumo LB buvo pranašesnis už NB.

Jocius (2017), savo tyrimuose lygindamas betono užpildo įtaką ugnies atsparumui, nustatė, kad betonas su keramzito užpildu turi pranašumą atsparumo ugniai požiūriu, lyginant su betonais, kurie turėjo įprastus užpildus: žvirgždą, dolomitą ar granitą. Betono su keramzito užpildu gniuždomasis stipris po 3 valandų kaitinimo pagal standartinę gaisro kreivę sumažėjo apie 25–26 %, o betono su kitais užpildais – 43–49 %. Tai aiškinama mažesnėmis betono su tokiu užpildu terminėmis deformacijomis.

Bilodeau *et al.* (1995) paskelbė, kad dėl didesnio drėgmės kiekio, esančio LB užpilde, absorbuotas vanduo gali padidinti betono atskilinėjimo riziką veikiant ugniai.

1.3.2. Technologinės savybės

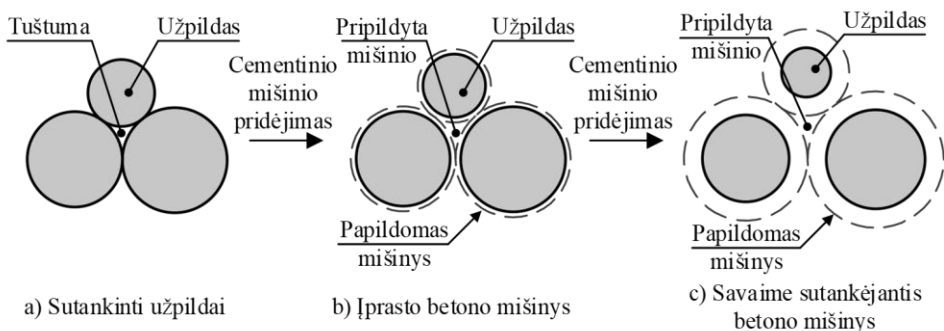
Klojumas

Reologinės lengvojo betono savybės skiriasi nuo normaliojo betono savybių. LB klojimas ir apdirbimas dėl mažo lengvųjų užpildų tankio ir šiurkščios paviršiaus tekstūros (ypač trupintiems užpildams) reikalauja daugiau fizinių pastangų. Klojumas – viena iš svarbiausių reologinių savybių, kuris nustatomas atliekant slankumo bandymą. Kadangi slankumas priklauso nuo betono svorio, LB atveju pasiekiamas geras klojumas esant mažesnei slankumo vertei. ACI 213R-14 rekomenduoja 75 mm slankumo vertę, o Mehta ir Monteiro (2006) teigia, kad net 50–75 mm slankumas gali būti tinkamas, reikiamam klojumui pasiekti (normaliajam betonui rekomenduojama 100–125 mm reikšmė). LB klojumas labai priklauso nuo užpildo pradinio prisotinimo, kadangi šiuo atveju užpildas gali daugiau ar mažiau sugerti vandens esančio šviežiame mišinyje. Kai užpildai įgeria vandenį po mišinio paruošimo, slankumo sumažėjimas gali būti rimta problema betonuojant. Ši problema gali būti kontroliuojama užpildus iš anksto drėkinant (Mehta ir Monteiro 2006; Neville 2011). Paminėtina, kad didelis slankumas ir per ilgas vibravimas yra dvi pagrindinės priežastys, sukeliančios LB išsisluoksniavimą: lengvasis užpildas pradeda plūduriuoti paviršiuje, o cementinis skiedinys, reikalingas betonavimui užbaigti ir paviršiui apdirbti, lieka apačioje (skirtingai nei normaliojo betonu atveju, kai užpildas nusėda apatiniuose elemento sluoksniuose, o cementinis skiedinys – viršutiniuose). Būtina pabrėžti, LB mišinius reikia vibruoti trumpiau nei normaliojo betono, nes dėl didesnio lengvojo užpildo ir kitų sudedamųjų dalių tankio skirtumų LB yra daug jautresnis išsisluoksniavimui.

Siekiant išvengti per ilgo vibravimo galimybes, kaip alternatyva gali būti naudojamas savaime sutankėjantis lengvasis betonas (SSLB). Jis turi ir daugiau privalumų: paprastesni betonavimo darbai, sumažėjusi statybų trukmė ir kaina,

mažesnis triukšmo lygis statybvietyje. Šio tipo betono klojumas taip pat yra pagrindinis veiksnys, lemiantis savaime sutankėjančio lengvojo betono naudojimą ir fizikines, mechanines savybes. Praktinio taikymo požiūriu SSLB turi pasižymėti dideliu takumu, deformatyvumu, geromis užpildymo savybėmis ir dideliu atsparumo išsisluoksniavimui (Maghsoudi *et al.* 2011; Madandoust *et al.* 2011; Wu *et al.* 2009). Tinkamas SSLB mišinių klojumas yra būtinas siekiant užtikrinti tinkamą (be vidinių defektų) betonuojamo elemento suformavimą. Taip pat SSLB užpildų dalelės turėtų vienodai pasiskirstyti mišinyje, o išsisluoksniavimo rizika transportavimo ir pylimo į klojinius metu turėtų būti sumažinama iki minimalaus lygmens (Wu *et al.* 2009). Savaime sutankėjantis betonas yra ypač jautrus mišinio sudedamųjų dalelių savybių pasikeitimui ir jų proporcijoms mišinyje, todėl jo gamyba reikalauja didelės kokybės kontrolės (Vakhshouri ir Nejadi 2016). Lyginant su įprastuoju, savaime sutankėjantis betonas turi didesnį cementinės pastos (cemento ir mikroužpildų) kiekį (Juradin *et al.* 2012) (1.6 pav.), o tai klojant padeda užpildams tekėti be didesnių kliūčių: cementinė tešla sumažina trintį tarp užpildų ir pagerina taktiškias betono savybes. Tai ypač svarbu SSLB atveju, nes lengvieji užpildai turi mažesnę vidinę potencinę energiją, kuri, veikiant gravitacijai, turi užtikrinti sklandų betono tekėjimą (Juradin *et al.* 2012).

Norint apibūdinti SSLB klojumą, atliekami slankumo ir pasklidimo (angl. *slump flow*), V formos piltuvėlio (angl. *V-funnel*), L formos dėžės (angl. *L-box*), U formos dėžės (angl. *U-box*), šlapio sieto atsiskyrimo (angl. *wet sieve segregation*) ir paviršiaus nuslūgimo (angl. *surface settlement*) bandymai.



1.6 pav. Schemiškas sutankintų užpildų ir cementinio mišinio pasiskirstymas

Fig. 1.6. Schematic distribution of compacted aggregates and cement paste

Pumpavimas

Betono siurblių vystymosi pradžioje kilo sunkumų su LB pumpavimu, ypač jei lengvasis užpildas nebuvo uždaro struktūros. Šios problemos priežastis ta, kad veikiant pumpavimo slėgiui į užpilde esančias poras įstumiamas vanduo. Dėl to

mišinys tampa per sausas ir betono siurblio žarnoje pradeda strigti (Neville 2011). Siekiant išvengti problemų betonuojant, lengvieji užpildai yra drėkinami arba vakuumuojami vandenyje prieš formuojant mišinį (ACI 213R-14).

1.3.3. Mechaninės savybės

Gniuždomasis stipris

Lyginant su vienodos sudėties normaliuoju betonu, lengvojo betono gniuždomasis stipris yra mažesnis. Kita vertus, LB mišiniai turi didesnę naudingumo koeficientą, apibūdinamą mechaninio stiprio ir tankio santykiu (Moravia *et al.* 2010). Chandra ir Berntsson (2002), Videla ir Lopez (2002) ir Faust (2000) teigia, kad LB stipris priklauso ne tik nuo matricos mišinio stiprumo (kontroliuojant V/C santykį, gaunamas tankesnis ir stipresnis LB (Vakhshouri ir Nejadi 2016)) bei sąlyčio zonos tarp užpildo ir matricos mišinio, bet ir nuo tūrio, kurį užima lengvasis užpildas (arba nuo lengvojo betono tankio (Kockal ir Ozturan 2011)) bei pačio užpildo savybių. Skirtingai nei įprasti smulkūs ir stambūs užpildai, lengvasis užpildas yra poringa ir labiau deformatyvi medžiaga, o jos mechaninis atsparumas daug mažesnis. Todėl LB mišiniuose silpniausia vieta yra pats užpildas, o ne cementinė matrica ar jų sąlyčio zona (Chi *et al.* 2003). Tai lemia, kad veikiant apkrovai mikroplyšiai pirmiausia formuojasi lengvajame užpilde, o vėliau cementiniame akmenyje. Lengvojo užpildo dalelių stipris ir standumas priklauso nuo porų išsidėstymo, formos ir bendro tūrio dalelėje, kurį sudaro poros. Didelės netaisyklingos formos kiaurymės susilpnina lengvuosius užpildus, o tai savo ruožtu susilpnina ir patį LB (Kockal ir Ozturan 2011). Shafigh *et al.* (2018) nustatė, kad LB su LECA keramzito užpildu pasiekia savo viršutinę stiprio ribą jau po 7 kietėjimo parų, o normalusis betonas savo viršutinės vertės nepasiekia ir po 28 kietėjimo parų.

SSLB gniuždomasis stipris priklauso ne tik nuo pirmiau minėtų veiksnių, bet ir nuo skiedinio bei lengvojo užpildo santykio: didinant šį santykį, didėja ir gniuždomasis LB stipris (Nepomuceno *et al.* 2018). Kitaip tariant, SSLB gniuždomasis stipris labai priklauso nuo matricos mišinio gniuždomojo stiprio. Norint gauti didesnio nei 45 MPa gniuždomojo stiprio SSLB mišinį, naudojant tam tikrą lengvojo užpildo tūrį betone, gali prireikti didesnio cemento kiekio. Tokiu būdu kompensuojamas mažas lengvojo užpildo mechaninis atsparumas. Ekonominiu požiūriu gaminti LB, kurio stipris mažesnis nei 45 MPa, daugeliu atvejų yra geresnis pasirinkimas dėl kainos ir naudos santykio (Nepomuceno *et al.* 2018).

Laikomosioms konstrukcijoms naudojamų LB mišinių gniuždomasis stipris po 28 parų dažniausiai svyruoja nuo 20 iki 35 MPa. Naudojant aukštos klasės cementą ir geros kokybės mažo skersmens lengvuosius užpildus (9–13 mm didžiausi), galima pagaminti nuo 40 iki 50 MPa stiprio betoną (Neville 2011). Kontroliuojant mikroporingumą, lengvasis užpildas gali būti panaudotas gaminant ir stiprųjį lengvąjį betoną, kurio gniuždomasis stipris – 70–75 MPa, o tankis kinta

nuo 1840 iki 2000 kg/m³ (Mehta ir Monteiro 2006). Norint pagaminti 20 MPa stiprio LB, gali prireikti 230–360 kg/m³ cemento, 40 MPa – 420–500 kg/m³. Norint gauti didesnio stiprio LB mišinius, cemento kiekis smarkiai išauga, pvz., norint pagaminti 70 MPa stiprio betoną, gali prireikti apie 630 kg/m³ cemento (Neville 2011).

Tempiamasis stipris

Lengvojo betono tempiamasis stipris dėl betone esančio lengvojo užpildo yra mažesnis, lyginant su normaliuoju betonu. Tempiamasis stipris priklauso nuo užpildo tempiamojo stiprio, jį supančio cementinio akmens savybių ir sąlyčio zonos tarp jų (Holm ir Bremner 2000). Nuo tempiamojo stiprio priklauso betono atsparumas šlyčiai, armatūros inkaravimo ilgis, sukibimo stiprumas ir atsparumas pleišėjimui (Dinakar 2012). Kockal ir Ozturan (2011) savo tyrimuose nustatė, kad LB skeliamasis tempiamasis stipris yra šiek tiek mažesnis už NB. Kaip ir normaliojo betono atveju, tempiamojo stiprio ir gniuždomojo stiprio santykis gerokai sumažėja didėjant gniuždomajam stipriui. Dėl minėtų priežasčių, apskaičiuojant tempiamąjį stiprį, naudojamas koregavimo koeficientas, priklausantis nuo betono tankio.

Tempiamasis stipris dažnai tapatinamas su skeliamuoju tempiamuoju stipriu. Skiriasi šių stiprių nustatymo būdas: tempiamasis stipris nustatomas bandinį tiesiogiai tempiant, skeliamasis stipris netiesiogiai – skėlimo bandymu. EC2 nurodo normaliojo betono koregavimo koeficientą tempiamajam stipriui apskaičiuoti pagal skeliamąjį tempiamąjį stiprį. Šis koeficientas lygus 0,9. Model Code 2010 (2013) (MC2010) daryta prielaida, kad lengvojo betono tempiamojo ir skeliamojo tempiamojo stiprio vertės yra vienodos.

Tempiamasis lengvojo betono stipris pagal Lietuvoje galiojančias projektavimo normas (EC2, STR 2.05.05:2005 (STR)) apskaičiuojamas imant koeficientą, įvertinantį tankio įtaką mechaninėms savybėms :

$$f_{lctm} = f_{ctm} \eta_1, \quad (1.1)$$

čia

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{lck}^{(2/3)}, \text{ kai betonas } \leq \text{LC50/55}, \quad (1.2)$$

$$f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln[1 + (f_{lck}/10)], \text{ kai betonas } > \text{LC50/55}, \quad (1.3)$$

$$\eta_1 = 0,40 + 0,60 \cdot \rho/2200, \quad (1.4)$$

čia ρ – lengvojo betono tankis, kg/m³.

Pagal JAV normas (ACI) tempiamasis skeliamasis stipris apskaičiuojamas pagal formulę, kurioje įvertinama ne betono tankio reikšmė, bet lengvojo betono tipas:

$$f_{ct} = 0,56\lambda\sqrt{f_{cm}}, \quad (1.5)$$

čia λ – koeficientas, priklausantis nuo betono tipo (0,75 – visi lengvieji užpildai, 0,75–0,85 – smulkaus mišinio LB, 0,85 – LB su smėliu, 0,85–1,0 – LB su smėliu, stambaus mišinio, 1,0 – NB).

JAV ACI 224.2R rekomendacijose tempiamasis betono stipris apskaičiuojamas taikant formulę, kuri priklauso nuo betono tankio:

$$f_{ct} = 0,0069\sqrt{\rho f_{cm}}. \quad (1.6)$$

Dauguma autorių, tyrinėdami įvairių tipų LB, pateikia savo išvestas betono tempiamojo skeliamojo stiprio apskaičiavimo formules, kurios dažniausiai yra kaip priklausomybė nuo gniuždomojo kubinio arba cilindrinio stiprio. Vakhshouri (2017) ir Shafigh *et al.* (2018) darbuose apibendrintos skirtingų LB tempiamojo stiprio apskaičiavimo formulės. Konstrukciniam LB ($f_{cm} > 17$ MPa) tinkamos formulės pateiktos 1.2 lentelėje.

1.2 lentelė. Skirtingų rūšių lengvojo betono tempiamojo skeliamojo stiprio apskaičiavimo priklausomybės

Table 1.2. Formulas for calculation of tensile strength of different type lightweight concrete

Eil. Nr.	Šaltinis	Formulė		Pastabos
1	Slate <i>et al.</i> (1986)	$f_{ct} = 0,41\sqrt{f_{cy}}$	(1.7)	Didelio stiprio LB ($21 \leq f_{cy} \leq 62$) MPa
2	Smadi ir Migdady (1991)	$f_{ct} = 0,46\sqrt{f_{cy}}$	(1.8)	Didelio stiprio LB su tufo užpildu
3	Neville (1995)	$f_{ct} = 0,23f_{cu}^{0,67}$	(1.9)	Aukštakrosnių šlako užpildas ($10 \leq f_{cu} \leq 65$) MPa
4	Gesoglu <i>et al.</i> (2004)	$f_{ct} = 0,27\sqrt[3]{f_{cu}^2}$	(1.10)	Šaltai surištų lakiųjų pelenų lengvasis stambus užpildas ($21 \leq f_{cu} \leq 47$) MPa
5	Babu <i>et al.</i> (2005)	$f_{ct} = 0,358f_{cu}^{0,675}$	(1.11)	Pūsto polistireno užpildas
6	Shafigh <i>et al.</i> (2010)	$f_{ct} = 0,20\sqrt{f_{cu}^2}$	(1.12)	Aliejinių palmių kevalų užpildas ($17 \leq f_{cu} \leq 37$) MPa
7	Shafigh <i>et al.</i> (2012)	$f_{ct} = 0,49\sqrt{f_{cu}}$	(1.13)	Susmulkintų aliejinių palmių kevalų užpildas ($35 \leq f_{cu} \leq 53$) MPa
8	Wegian (2012)	$f_{ct} = 0,087f_{cu} - 0,87$	(1.14)	Keramzito užpildas
9	Shafigh <i>et al.</i> (2013)	$f_{ct} = 0,23f_{cu}^{0,64}$	(1.15)	Aliejinių palmių kevalų užpildas ir lakiisiais pelenais

1.2 lentelės pabaiga
The end of **Table 1.2**

Eil. Nr.	Šaltinis	Formulė		Pastabos
10	Dinakar (2012)	$f_{ct} = 0,268f_{cu}^{0,675}$	(1.16)	Sukepintų lakiųjų pelenų užpildas (1900 ≤ ρ ≤ 2000) kg/m ³ (35 ≤ f _{cu} ≤ 45) MPa
11	Choi <i>et al.</i> (2014)	$f_{ct} = 0,81[(\rho/2200)^{1,5}f_{cy}]^{0,35}$	(1.17)	Keramzito užpildas (1610 ≤ ρ ≤ 1800) kg/m ³ (39 ≤ f _{cy} ≤ 48) MPa
12	Bogas ir Nogueira (2014)	$f_{ct} = 0,47f_{cy}^{0,5}$	(1.18)	Keramzito užpildas (1435 ≤ ρ ≤ 1870) kg/m ³ (30 ≤ f _{cy} ≤ 70) MPa
13	Vakhshouri (2017)	$f_{ct} = 0,1862f_{cy}^{0,8655}$	(1.19)	Pūsto polistireno užpildas 17 ≤ f _{cy} , MPa

Tempiamasis stipris iš lenkimo bandymų

Iš lenkimo bandymų nustatytas tempiamasis stipris priklauso nuo tų pačių savybių kaip ir tempiamasis stipris. Vis dėlto, dėl skirtingos bandymų metodikos, šiuo būdu nustatytas stipris gaunamas didesnis lyginant su ašinio tempimo bandymu nustatytais reikšmėmis.

Pagal EC2 lenkiamasis stipris negali būti mažesnis už tempiamąjį stiprį ir apskaičiuojamas pagal formulę, kuri priklauso nuo bandomo elemento aukščio ir tempiamojo stiprio:

$$f_{lctm,fl} = \max\{(1,6 - h/1000)f_{lctm}; f_{lctm}\}, \quad (1.20)$$

čia h – bendras elemento aukštis, mm; f_{lctm} – vidutinis ašinis tempiamasis stipris.

MC2010 pateikia kitokią lenkiamojo stiprio apskaičiavimo formulę:

$$f_{lctm,fl} = f_{lctm} \frac{1 + 0,06h^{0,7}}{0,06h^{0,7}}. \quad (1.21)$$

Pagal ACI lenkiamasis stipris apskaičiuojamas taip:

$$f_r = 0,62\lambda\sqrt{f_{cm}}, \quad (1.22)$$

čia λ – koeficientas, priklausančias nuo betono tipo (0,75 – visi lengvieji užpildai, 0,75–0,85 – smulkaus mišinio LB, 0,85 – LB su smėliu, 0,85–1,0 – LB su smėliu, stambaus mišinio, 1,0 – normalusis betonas).

Kitų autorių siūlomos konstrukcinio LB tempiamojo lenkiamojo stiprio skaičiavimo formulės pateikiamas 1.3 lentelėje.

1.3 lentelė. Lengvojo betono tempiamojo lenkiamojo stiprio skaičiavimo formulės**Table 1.3.** Formulas for calculation of tensile flexural strength of lightweight concrete

Eil. Nr.	Šaltinis	Formulė		Pastabos
1	Short ir Kinnburgh (1963)	$f_r = 0,76\sqrt{f_{cu}}$	(1.23)	–
2	Slate <i>et al.</i> (1986)	$f_r = 0,35\sqrt{f_{cy}}$	(1.24)	Didelio stiprio LB ($21 \leq f_{cy} \leq 62$) MPa
3	Smadi ir Migdady (1991)	$f_r = 0,58\sqrt{f_{cy}}$	(1.25)	Didelio stiprio LB su tufo užpildu
4	Zhang ir Gjorv (1991a)	$f_r = 0,73\sqrt{f_{cu}}$	(1.26)	Didelio stiprio LB
5	Lo <i>et al.</i> (2004)	$f_r = 0,69\sqrt{f_{cu}}$	(1.27)	Keramzito užpildas ($1620 \leq \rho \leq 1850$) kg/m ³ ($29 \leq f_{cu} \leq 43$) MPa
6	Alengaram <i>et al.</i> (2008)	$f_r = 0,3\sqrt[3]{f_{cu}^2}$	(1.28)	Palmių branduolio kevalų užpildas ($28 \leq f_{cu} \leq 38$) MPa
7	Shafigh <i>et al.</i> (2012)	$f_r = 0,12f_{cu}^{1,03}$	(1.29)	Susmulkintų aliejinių palmių kevalų užpildas ($35 \leq f_{cu} \leq 53$) MPa
8	Tassew ir Lubell (2012)	$f_r = 0,33\sqrt{f_{cy}}$	(1.30)	Keramzito užpildas ($1580 \leq \rho \leq 1880$) kg/m ³ ($17 \leq f_{cy} \leq 36$) MPa
9	Bogas ir Nogueira (2014)	$f_r = 0,69\sqrt{f_{cy}}$	(1.31)	Keramzito užpildas ($1435 \leq \rho \leq 1870$) kg/m ³ ($30 \leq f_{cy} \leq 70$) MPa
10	Vakhshouri (2017)	$f_r = 1,266f_{cy}^{0,4062}$	(1.32)	Pūsto polistireno užpildas $17 \leq f_{cy}$, MPa

Tamprumo modulis

Lengvojo betono tamprumo modulis yra mažesnis už to paties gniuždomojo stiprio normaliojo betono modulį (Zhang ir Gjorv 1991a; Al-Khaiat ir Haque 1999; Kockal ir Ozturan 2011; Rumšys 2014; Bogas *et al.* 2015). Pavyzdžiui, 50–90 MPa gniuždomojo stiprio LB su keramzito užpildu arba sukepintų lakiųjų pelenų užpildu tamprumo modulis priklausomai nuo tankio gali būti nuo 18 iki 26 GPa. Tokio pat stiprio NB tamprumo modulis gali būti apie 12 GPa didesnis (Zhang ir Gjorv 1991a). Taigi LB tamprumo modulis priklausomai nuo tankio gali būti 25–40 % mažesnis už tokio pat stiprio NB tamprumo modulį. Tai patvirtino Al-Khaiat ir Haque (1999), kurių tyrimuose nustatyta, kad LC50 ir C50 klasės betonų tamprumo moduliai skyrėsi iki 29 %.

Lengvojo betono tamprumo modulis priklauso nuo betono gniuždomojo stiprio, tampriųjų sudedamųjų dalelių savybių, tūrio, kurį užima lengvasis užpildas bei mišinio proporcijų (Bogas *et al.* 2015). Taip pat nuo sąlyčio zonos tarp užpildo ir cementinio skiedinio (Hossain 2004). Kockal ir Ozturan 2011 nustatė, kad tamprumo modulis priklauso ne tik nuo tankio, bet ir nuo lengvojo užpildo porinės struktūros bei paviršiaus tekstūros. Be to, jei užpildo struktūra tanki ir poros išdėstytos taisyklingai, gaunama didesnė tamprumo modulio vertė nei betonuose su poringesniais užpildais.

Lengvojo betono tamprumo modulis gali būti išreikštas kaip funkcija, priklausanti nuo gniuždomojo stiprio ir tankio. Lietuvoje galiojančios normos EC2 ir STR pateikia vienodą LB tamprumo modulio apskaičiavimo formulę:

$$E_{lcm} = 22(f_{lcm}/10)^{0,3}(\rho/2200)^2. \quad (1.33)$$

Model Code 2010 pateikia šiek tiek pakoreguotą formulę:

$$E_{lcm} = 21,5(f_{lcm}/10)^{0,3}(\rho/2200)^2. \quad (1.34)$$

ACI normose pateikiama formulė betono tamprumo moduliui apskaičiuoti (betono stipris yra ne mažesnis kaip 17 MPa):

$$E_c = 0,043\rho^{1,5}\sqrt{f_c}, \quad (1.35)$$

čia f_c – standartinis cilindrinis gniuždomasis stipris, MPa.

Ši išraiška galioja betonams, kurių tankis yra 1440–2560 kg/m³. Apskaičiuotos vertės nuo išmatuotų gali skirtis iki 20 % (ACI).

ACI 213R (2014) rekomendacijose kaip alternatyva ACI 318:2014 normoms pateikiama kitokia tamprumo modulio apskaičiavimo formulė:

$$E_c = 1,3195 \cdot 10^{-8} \rho^{2,687} f_c^{0,24}. \quad (1.36)$$

Ši formulė tinka lengviesiems ir didelio stiprio betonams, kurių tankis svyruoja nuo 1600 iki 2480 kg/m³, o gniuždomasis stipris – nuo 7 iki 158 MPa.

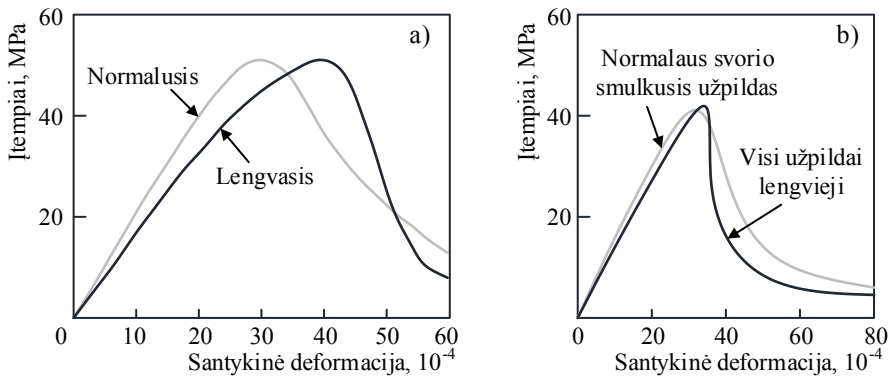
Vakhshouri (2017) ir Shafigh *et al.* (2018) apibendrina kitų autorių pasiūlytas LB tamprumo modulio apskaičiavimo priklausomybes. Papildytos ir konstrukciniam LB tinkamos tamprumo modulio apskaičiavimo formulės pateiktos 1.4 lentelėje.

Dėl labai gero ryšio tarp lengvųjų užpildų ir rišamosios medžiagos LB neatsiranda ankstyvieji mikroplyšiai lengvųjų užpildų ir rišamosios medžiagos jungimosi vietose. Dėl šios priežasties gniuždomojo LB įtempių ir deformacijų priklausomybė yra tiesinė, dažnai net iki 90 % stiprumo ribos (Zhang ir Gjorv 1991a). Panašią tendenciją pastebėjo ir Rossignolo *et al.* (2003), kuris tyrinėjo lengvojo betono ($\rho = 1460\text{--}1605 \text{ kg/m}^3$, $f_{lcm} = 39,5\text{--}53,6 \text{ MPa}$) tamprumo modulį su keramzito užpildu. Tyrimų metu bandinį apkrovus 80 % laikomosios galios apkrovos lygmeniu, gautos tiesinės įtempių ir deformacijų diagramos.

1.4 lentelė. Lengvojo betono tamprumo modulio skaičiavimo formulės**Table 1.4.** Formulas for modulus of elasticity calculation of lightweight concrete

Eil. Nr.	Šaltinis	Formulė		Pastabos
1	FIP (1983)	$E_{lcm} = 0,04\sqrt{\rho^3 f_{cu}}$	(1.37)	–
2	Slate <i>et al.</i> (1986)	$E_{lcm} = (0,062 + 0,0297\sqrt{f_{cy}})\rho^{1,5}$	(1.38)	Didelio stiprio LB ($21 \leq f_{cy} \leq 62$) MPa
3	Zhang ir Gjorv (1991a)	$E_{lcm} = 9,5 \cdot f_{cy}^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho}{2400}\right)^{1,5}$	(1.39)	Didelio stiprio LB ($60 \leq f_{cy} \leq 100$) MPa
4	Tasnimi (2004)	$E_{lcm} = 2,1684f_{cy}^{0,535}$	(1.40)	Dirbtinis lengvasis užpildas ($15 \leq f_{cy} \leq 55$) MPa
5	Alengaram <i>et al.</i> (2008)	$E_{lcm} = 5 \left(\frac{\rho}{2400}\right)^2 (f_{cu})^{1/3}$	(1.41)	Palmių branduolio kevalų užpildas ($1640 \leq \rho \leq 1890$) kg/m ³ ($28 \leq f_{cu} \leq 38$) MPa
6	Hossain <i>et al.</i> (2011)	$E_{lcm} = 0,00003\rho^{1,5}\sqrt{f_{cy}}$	(1.42)	Pemzos užpildas ($1460 \leq \rho \leq 2185$) kg/m ³ ($16 \leq f_{cu} \leq 35$) MPa
7	Dinakar (2012)	$E_{lcm} = 4,2\sqrt{f_{cu}}$	(1.43)	Sukeptintų lakiųjų pelenų užpildas ($1900 \leq \rho \leq 2000$) kg/m ³ ($35 \leq f_{cu} \leq 45$) MPa
8	Tassew ir Lubell (2012)	$E_{lcm} = 0,031\rho^{1,5}\sqrt{f_{cy}}$	(1.44)	Keramzito užpildas ($1580 \leq \rho \leq 1880$) kg/m ³ ($17 \leq f_{cy} \leq 36$) MPa
9	Ahmmad <i>et al.</i> (2014)	$E_{lcm} = 0,0026f_{cu}^{2,3546}$	(1.45)	Palmių kevalų klinkerio užpildas ($1700 \leq \rho \leq 1930$) kg/m ³ ($27 \leq f_{cu} \leq 38$) MPa
10	Vakhshouri (2017)	$E_{lcm} = 4,21f_{cy}^{0,508}$	(1.46)	Pūsto polistireno užpildas $17 \leq f_{cy}$, MPa

Clarke (1993) pateikė lyginamąją gniuždomojo LB ir NB įtempių ir deformacijų priklausomybę (1.7 a pav.). Iš pateiktų diagramų matyti, kad panašaus stiprio betonų kylančiosios dalys skiriasi dėl mažesnio LB tamprumo modulio. Nagrinėjant krintančiąją dalį, gaunamos priešingos tendencijos: pasiekus gniuždomojo stiprio ribą LB diagramos dalis krinta greičiau, t. y. LB yra trapesnė medžiaga, lyginant su NB. Neville (2011) palygino lengvuosius betonus su keramzito užpildu (1.7 b pav.). Juoda linija pažymėta diagrama – betono su visais lengvaisiais užpildais, pilka – su stambiais lengvaisiais užpildais, bet įprastu smulkiuoju užpildu. Diagramų sugretinimas parodo, kad kuo lengvesnis betonas, tuo labiau mažėja tamprumo modulis (kylančiosios diagramos dalies statumas) ir betonai tampa trapesnė medžiaga (staigų suirimą apibūdina stati krintančioji diagramos dalis).



1.7 pav. Gniuždomojo betono įtempių ir deformacijų diagramos: a) lengvojo ir normaliojo betono pavyzdys (pagal Clarke 1993); b) lengvojo betono su keramzito užpildu (pagal Neville 2011)

Fig. 1.7. Stress and strain relationship of concrete in compression: a) example of lightweight and ordinary concrete (according to Clarke 1993); b) Lightweight concrete with expanded clay aggregate (according to Neville 2011)

1.4. Armuoto lengvojo betono elementų laikomosios galios ir deformacijų skaičiavimo metodai

Inžinerinėje praktikoje lengvojo betono laikomosios galios, deformacijų ir pleišėjimo analizei taikomi tokie patys skaičiavimo metodai kaip ir normaliajam betonui. Taikant šiuos metodus, LB elgsenos ypatumai netiesiogiai įvertinami pagal atitinkamas mechanines savybes, kurios savo ruožtu priklauso nuo tankio (žr. 1.3.3 skirsnį). Rakoczy ir Nowak (2013) nustatė, kad LB lenkiamų elementų elgsena praktiškai nesiskiria nuo normaliojo betono. Skirtumas išryškėja prognozuojant laikomąją galią įstrižajame pjūvyje. Autorių atlikti tyrimai parodė, kad, taikant ACI normų metodiką, armuoto LB elementų atsparumas įstrižajame pjūvyje prognozuojamas su 10 % mažesne atsarga, lyginant su įprasto gelžbetonio elementais. Kita vertus, gaunamos atsparumo vertės vis dar išlieka konservatyvios, t. y. į atsargos pusę (Rakoczy ir Nowak 2013). Taip pat nustatyta, kad veikiant šlyties jėgai dėl betone esančio lengvojo užpildo pasikeičia ne tik betono, bet ir pačios skersinės armatūros elgsena. Panašias tendencijas pastebėjo ir kiti autoriai (Ramirez et al. 2004; Wu et al. 2018). Jie teigia, kad skirtingos projektavimo normos su gana didele atsarga vertina LB įstrižojo pjūvio stiprumą. Šiame darbe laikomoji gale įstrižajame pjūvyje plačiau nenagrinėjama.

Tradicinių gelžbetoninių elementų deformacijų skaičiavimo metodų nuodugni apžvalga pateikta Sokolov (2010) disertacijoje. Šiame šaltinyje apžvelgti

Murashev (1950), Rozenbliumo (1964), Piyasena (2002) siūlomi metodai. Taip pat galima išskirti JAV projektavimo normose ACI 318 taikomas klasikines Branson (1965) pasiūlytas išraiškas bei jų modifikacijas (Al. Zaid *et al.* 1991; Alshaikh ir Al-Zaid 1993; Grossman 1981; Rangan 1982). Plyšių pločių analizės metodai apžvelgti Allam *et al.* (2012) darbe. Jame galima rasti Gergely ir Lutz (1968), Oh ir Kang (1987), Frosch (1999) bei kitų autorių metodus. Detali pleišėjimo metodų apžvalga taip pat pateikta šaltinyje (Borosnyoi ir Balazs 2005).

Toliau šiame poskyryje pateikiami STR, EC2, MC2010 ir ACI projektavimo normose reglamentuojami lenkiamųjų elementų laikomosios galios normaliniame pjūvyje ir deformacijų (kreivių) skaičiavimo metodai. Išskirtinis dėmesys skiriamas parametrams, įvertinantiems lengvojo betono elgsenos ypatumus. Poskyryje papildomai apžvelgti kitų autorių pasiūlyti armuoto lengvojo betono elementų deformacijų ir pleišėjimo analizės metodai.

1.4.1. Lenkiamųjų elementų normalinio pjūvio stiprumas

STR ir EC2

Stačiakampio skerspjūvio, vienpusio armavimo lenkiamųjų elementų normalinio pjūvio stiprumas pagal STR ir EC2 apskaičiuojamas taikant tą pačią išraišką kaip ir normaliajam betonui:

$$M_{Rds} = A_{s1} f_{yd} d \left(1 - \frac{f_{yd} A_{s1}}{2 \eta f_{lcd} b d} \right), \quad (1.47)$$

čia A_{s1} – tempiamosios armatūros skerspjūvio plotas; f_{yd} – skaičiuotis armatūros stipris pagal takumo ribą; d – efektyvusis skerspjūvio aukštis; η – gniuždomojo elemento įtempių redukavimo koeficientas; f_{lcd} – skaičiuotinis lengvojo betono cilindrinis gniuždomasis stipris; b – skerspjūvio plotis.

Lengvojo betono įtaka įvertinama tik nustatant skaičiuotinį lengvojo betono gniuždomąjį stiprį, imant kitokią koeficiento α_{lcc} reikšmę nei NB atveju:

$$f_{lcd} = \frac{\alpha_{lcc} f_{lck}}{\gamma_c}, \quad (1.48)$$

čia α_{lcc} – koeficientas, kurį taikant atsižvelgiama į gniuždomojo stiprio ilgalaikius efektus ir nepalankius efektus, atsirandančius dėl apkrovos veikimo būdo ($\alpha_{lcc} = 0,85$). Normaliojo betono šis koeficientas pagal EC2 $\alpha_{lcc} = 0,9$, pagal STR $\alpha_{lcc} = 1,0$; γ_c – betono dalinis koeficientas.

Būtina pabrėžti, kad nustatant skaičiuotinį gniuždomąjį stiprį pagal STR normas taikomas papildomas α koeficientas, kuris vienodas tiek normaliajam, tiek lengvajam betonams.

ACI

Stačiakampio skerspjūvio vienpusio armavimo lenkiamųjų elementų normalinio pjūvio stiprumas pagal ACI apskaičiuojamas taip pat kaip ir NB elementams:

$$M_u = \phi \left[A_s f_y d \left(1 - \frac{A_s f_y}{1,7 f_c b d} \right) \right], \quad (1.49)$$

čia ϕ – stiprį mažinantis koeficientas; f_y – armatūros takumo įtempiai; f_c – betono cilindrinis gniuždomasis stipris.

1.4.2. Deformacijų (kreivių) apskaičiavimo metodai*STR*

Armuoto lengvojo betono kreivis, vadovaujantis STR normomis, apskaičiuojamas taikant tas pačias formules kaip ir normaliajam betonui. LB įtaka įvertinama koeficientais. Elemento, kurio tempiamojoje zonoje nėra susidariusių normalinių plyšių, kreivis apskaičiuojamas kaip vientiso kūno:

$$\kappa = \frac{M}{\varphi_{c1} E_{lcm} I_{eff}}, \quad (1.50)$$

čia M – veikiančiojo lenkimo momento reikšmė; φ_{c1} – koeficientas, kuriuo įvertinama betono trumpalaikio valkšnumo įtaka ($\varphi_{c1} = 0,85$ taikomas sunkiojo, smulkiagrūdžio, lengvojo su tankiu smulkiu užpildu betono elementams, $\varphi_{c1} = 0,70$ lengvojo su poringu smulkiu užpildu betono elementams); E_{lcm} – lengvojo betono vidutinis tamprumo modulis; I_{eff} – nesupleišėjusio skerspjūvio efektyvusis inercijos momentas;

Elemento, kuriame atsiradę normaliniai plyšiai, kreivis apskaičiuojamas taikant šią formulę:

$$\kappa = \frac{M}{dz} \left[\frac{\psi_s}{E_s A_{s1}} + \frac{\psi_c}{(\varphi_f + \xi) b d E_{lcm} \nu} \right], \quad (1.51)$$

čia d – efektyvusis skerspjūvio aukštis; z – atstumas nuo tempiamosios armatūros skerspjūvio centro iki gniuždomosios zonos atstojamosios virš plyšio, apskaičiuojamas pagal formulę:

$$z = d \left[1 - \frac{\frac{2a_2}{d} \varphi_f + \xi^2}{2(\varphi_f + \xi)} \right], \quad (1.52)$$

čia a_2 – gniuždomosios armatūros apsauginis sluoksnis; ψ_s – koeficientas, kuris įvertina tempiamojo betono įtaką ruožuose tarp plyšių. Šis koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią priklausomybę:

$$\psi_s = 1,25 - \varphi_{ls}\varphi_m, \quad (1.53)$$

čia φ_{ls} – koeficientas, įvertinantis ilgalaikių apkrovų poveikį; φ_m – koeficientas, įvertinantis veikiančios apkrovos lygmenį ir yra lygus $\varphi_m = M_{cr}/M$; ψ_c – koeficientas įvertinantis gniuždomojo betono deformacijų netolygumą ir yra lygus: lengvojo betono aukštesnės nei LC12/13 klasės – 0,9; lengvojo LC12/13 ir žemesnės klasės – 0,7; konstrukcijoms, apskaičiuotoms daugkartinių apkrovų poveikiui, neatsižvelgiant į betono klasę ir rūšį, – 1,0; φ_f – koeficientas apskaičiuojamas pagal tokią formulę:

$$\varphi_f = \frac{\left(\alpha \frac{A_{s2}}{2v}\right)}{bd}, \quad (1.54)$$

čia A_{s2} – gniuždomosios armatūros skerspjūvio plotas; α – armatūros ir lengvojo betono tamprumo modulių santykis; ξ – sąlyginis gniuždomosios betono zonos aukštis, apskaičiuojamas taip:

$$\xi = \frac{1}{\beta + \frac{1 + 5(\delta_m + \lambda)}{10\alpha\rho_1}}, \quad (1.55)$$

čia β – koeficientas, įvertinantis betono tipą ir lygus: sunkiojo ir lengvojo betono – 1,8; smulkiagrūdžio – 1,6; δ_m – gniuždomąją zoną charakterizuojantis koeficientas, apskaičiuojamas $\delta_m = M/(bdf_{lcm})$; ρ_1 – armavimo procentas; λ – koeficientas, apskaičiuojamas pagal išraišką $\lambda = \varphi_f(1 - a_{s2}/2d)$; v – koeficientas, įvertinantis tamptai plastikinę gniuždomojo betono elgseną; d – efektyvusis skerspjūvio aukštis; b – skerspjūvio plotis.

Būtina pabrėžti, kad prie šių normų tobulinimo daug prisidėjo Lietuvos mokslininkai: A. Rozenbliumas, A. Kudzys, G. Marčiukaitis, G. Kaklauskas, J. Valionis, R. Kliukas ir kt.

EC2 ir MC2010

Lengvojo betono elementų kreivis, taikant EC2 ir MC2010 metodikas, apskaičiuojamas pagal tas pačias formules kaip ir įprasto svorio betono elementų. Šių normų skaičiavimo metodikose išskiriamos dvi gelžbetoninių elementų deformimosi stadijos. Pirmojoje stadijoje (iki pleišėjimo) elementas deformuojasi tamptai. Šioje stadijoje elemento kreivis apskaičiuojamas taikant fundamentines medžiagų mechanikos priklausomybes. Antrojoje stadijoje (elementas visiškai supleišėjęs) visus tempimo įtempius perima tempiamoji armatūra. Šioje stadijoje

kreivis apskaičiuojamas taikant visiškai supleišėjusio skerspjūvio geometrinės charakteristikas.

Vidutinis skerspjūvio kreivis tarpinėse elgsenos stadijose apskaičiuojamas interpoliuojant tarp I ir II stadijos kreivių reikšmių, taikant ζ pasiskirstymo koeficientą. Tokiu būdu įvertinamas tempiamojo sustandėjimo (angl. *tension stiffening*) efektas. Vidutinis kreivis apskaičiuojamas pagal šią formulę:

$$\kappa = (1 - \zeta) \frac{M}{E_{lcm} I_u} + \zeta \frac{M}{E_{lcm} I_c}, \quad (1.56)$$

čia κ – skerspjūvio vidutinis kreivis nuo nagrinėjamos apkrovos; M – veikiantis lenkimo momentas; I_u – nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas; I_c – visiškai supleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas; ζ – pasiskirstymo koeficientas (kurį taikant atsižvelgiama į skerspjūvio tempiamąjį standinimą). Jei skerspjūvis nesupleišėjęs, $\zeta = 0$, kitu atveju apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\zeta = 1 - \beta \left(\frac{M_{cr}}{M} \right)^2, \quad (1.57)$$

čia M_{cr} – pleišėjimo momentas; β – koeficientas, kuriuo atsižvelgiama į apkrovimo trukmės arba kartotinės apkrovos įtaką vidutinėms deformacijoms. Koeficientas $\beta = 1,0$ jei veikia trumpalaikė statinė apkrova, $\beta = 0,5$, jei apkrovos ilgalaikė arba ciklinė.

EC2 pateikiama išraiška betono susitraukimo deformacijų sukeliama kreivio apskaičiavimui:

$$\kappa_{cs} = \varepsilon_{cs} \alpha_e \frac{S}{I}, \quad (1.58)$$

čia ε_{cs} – laisvoji susitraukimo deformacija; α_e – armatūros ir betono tamprumo modulių santykis (efektyvusis modulinis koeficientas); S – armatūros skerspjūvio ploto statinis momentas aplink skerspjūvio sunkio centrą; I – skerspjūvio ploto inercijos momentas. Ši priklausomybė dažniausiai taikoma ilgalaikių įlinkių (kreivių) apskaičiavimui įvertinant prieaugį dėl susitraukimo. Kita vertus, traukiantis betonui, dėl armatūros suvaržymo, betone dar prieš apkrovimą atsiranda tempimo įtempiai, kurie lemia pleišėjimo ribos sumažėjimą. Šis efektas stadijoje iki apkrovimo euronormų trumpalaikių kreivių apskaičiavimo metodikoje tiesiogiai nevertinamas.

ACI

Lengvojo betono elementų kreivis pagal ACI normas apskaičiuojamas pagal tas pačias normaliojo betono elementų formules. JAV normų metode kaip EC2 ar MC2010 nesupleišėjusio skerspjūvio elementų kreivis apskaičiuojamas, taikant klasikinę formulę bei tamprius geometrinius ir fizikinius rodiklius:

$$\kappa = \frac{M_a}{E_c I_g}, \quad (1.59)$$

čia M_a – maksimalus lenkimo momentas elemente; E_c – betono tamprumo modulis; I_g – nesupleišėjusio skerspjūvio inercijos momentas nevertinant armatūros įtakos.

Supleišėjus elementui, kreiviui apskaičiuoti naudojamas efektyvusis inercijos momentas, tam taikoma Branson (1965) pasiūlyta priklausomybė. Efektyvusis inercijos momentas I_e apskaičiuojamas interpoliuojant tarp nesupleišėjusio skerspjūvio (I_g) ir visiškai supleišėjusio skerspjūvio (I_{cr}) inercijos momentų pagal M_{cr}/M_a santykio funkciją:

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g, \quad (1.60)$$

čia M_{cr} – pleišėjimo momentas, apskaičiuojamas taip:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_g}{y_t}, \quad (1.61)$$

čia f_r – tempiamasis betono stipris, nustatytas iš lenkimo bandymo (angl. *modulus of rupture*); y_t – atstumas nuo centrinės nesupleišėjusio skerspjūvio ašies iki tempiamojo betono krašto nevertinant armatūros įtakos.

Supleišėjusio elemento kreivis apskaičiuojamas pagal (1.59) išraiškai analogišką formulę taikant efektyvųjį inercijos momentą:

$$\kappa = \frac{M_a}{E_c I_e}. \quad (1.62)$$

Carmo ir Dias-da-Costa (2015) modelis

Carmo ir Dias-da-Costa (2015) pastebėjo, kad EC2 ir MC2010 metoduose taikomo interpoliacinio koeficiento ζ vertės labai priklauso nuo pleišėjimo momento, tiksliau, skaičiuoti imto tempiamojo betono stiprio. Žinant, kad ši betono savybė turi didelę eksperimentinį sklaidą, minėtais metodais apskaičiuotos deformacijos (kreiviai) taip turėti didelę sklaidą ypač esant pleišėjimo apkrovai artimam apkrovimo lygmeniui. Carmo ir Dias-da-Costa (2015) pasiūlė deformacijoms skaičiuoti taikyti koeficientą, kuris, skirtingai nei normų algoritme, priklauso ne nuo dydžių N_{cr}/N ar M_{cr}/M , bet nuo armatūros įtempių santykio σ_s/f_{yk} , čia σ_s – tempimo įtempiai armatūroje, darant prielaidą, kad skerspjūvis supleišėjęs, f_{yk} – charakteristiniai armatūros takumo įtempiai. Tokiu būdu matematinėse priklausomybėse eliminuojama tempiamojo betono stiprio įtaka. Šios tendencijos ypač svarbios lengvojo betono elementams. Pritaikę pasiskirstymo koeficientą Carmo

ir Dias-da-Costa (2015) vidutinėms deformacijoms apskaičiuoti pasiūlė taikyti tokią priklausomybę:

$$\alpha = \alpha_{II} - \eta(\alpha_{II} - \alpha_I), \quad (1.63)$$

čia α_I ir α_{II} – atitinkamai nesupleišėjusio ir visiškai supleišėjusio skerspjuvio deformacijos (kreiviai); η – pasiskirstymo koeficientas, apskaičiuojamas taip:

$$\eta = \frac{1}{\rho_{p,eff}} \left(\frac{f_{yk}}{\sigma_s} \right) \left(\frac{E_{cm}}{50} \right)^2, \quad (1.64)$$

čia σ_s – tempiamosios armatūros įtempiai supleišėjusiame skerspjuvyje; E_{cm} – vidutinis betono tamprumo modulis; $\rho_{p,eff}$ – efektyvusis armavimo procentas.

Modelio autorių teigimu, pasiskirstymo koeficientas η priklauso ne tik nuo apkrovos lygio (kaip EC2 atveju pasiskirstymo koeficientas ζ), bet ir nuo abiejų supleišėjusio ir nesupleišėjusio betono stadijų. Šis koeficientas naudoja bendrąsias elemento deformacijas ir jam apskaičiuoti nereikalingas pleišėjimo apkrovos lygis. Pasiskirstymo koeficiento vertės kinta priklausomai nuo apkrovos lygio.

Pateiktas modelis gali būti tiesiogiai taikomas tempiamiems armuoto betono elementams. Metodiką adaptuojant lenkiamųjų armuotų LB elementų kreiviams apskaičiuoti, Carmo ir Dias-da-Costa (2015) siūlo papildomai įvertinti EC2 rekomenduojamą efektyviąją tempiamąją zoną. Efektyvusis tempiamosios zonos aukštis $h_{c,ef}$ apskaičiuojamas pagal šią EC2 priklausomybę:

$$h_{c,ef} = \min \left\{ 2,5(h - d); \frac{h - x}{3}; \frac{h}{2} \right\}, \quad (1.65)$$

čia h – skerspjuvio aukštis; x – gniuždomosios dalies aukštis; d – skaičiuojamasis aukštis;

Tuomet efektyvusis armavimo procentas $\rho_{p,eff}$ lenkiamiesiems elementams apskaičiuojamas pagal formulę:

$$\rho_{p,eff} = \frac{A_s}{bh_{c,ef}}, \quad (1.66)$$

čia A_s – armatūros plotas; b – skerspjuvio plotis;

Carmo ir Dias-da-Costa (2015) patikrino savo modelį atliekant eksperimentinius armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų bandymus. Prognozavimo paklaida dažniausiai neviršijo 10 %.

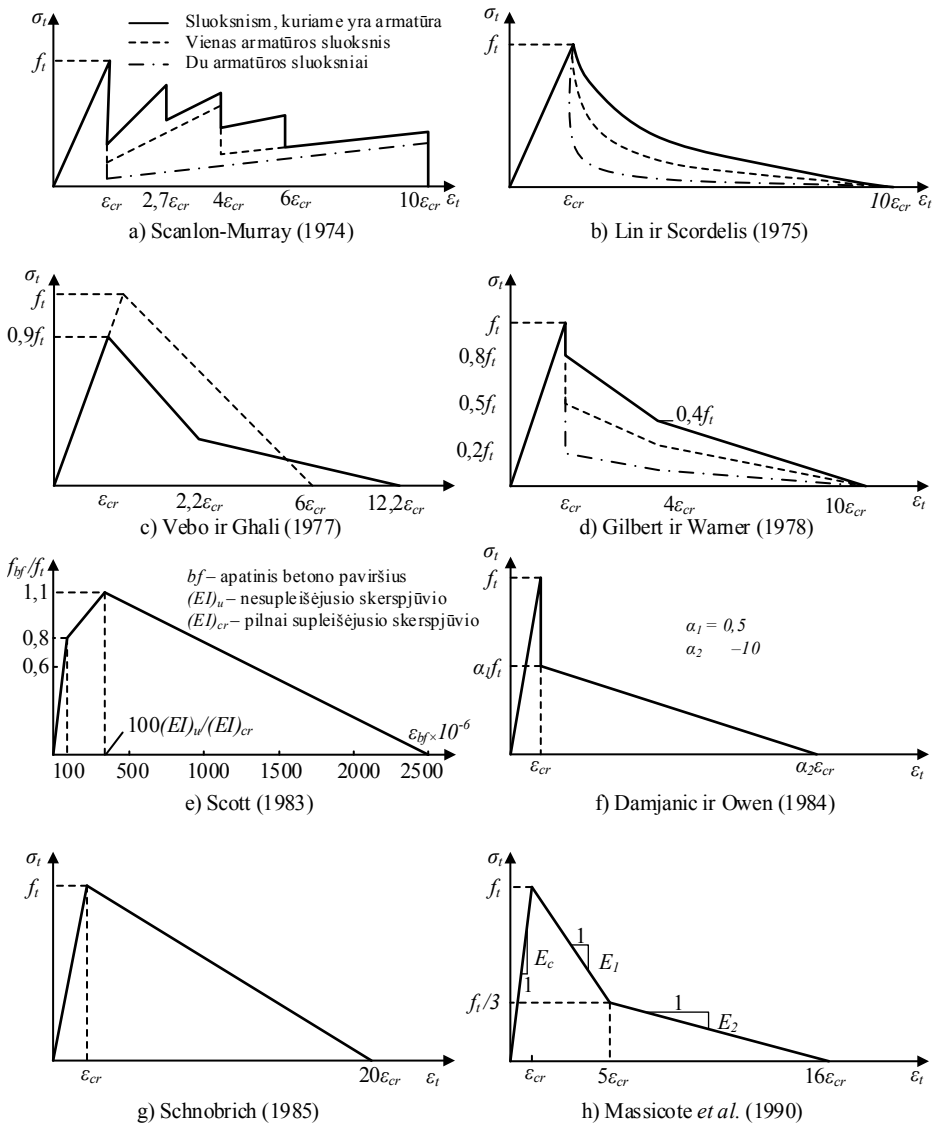
1.5. Lengvojo betono fizikiniai modeliai ir skaitiniai metodai, taikomi deformacijų analizei

Nepaisant visame pasaulyje gausiai atliktų teorinių ir eksperimentinių tyrimų lengvojo betono srityje, fizikinio modeliavimo problema nėra iki galo išspręsta (Koh *et al.* 2008). Tai yra dėl to, kad pastebima didelė tokių pažangių medžiagų kaip LB fizikinių charakteristikų variacija. LB mišiniams naudojamų medžiagų ir jų savybių įvairovė dažnai lemia teorinių rezultatų prognozavimo paklaidas, atsirandančias dėl neadekvačių fizikinių modelių (Carmo ir Dias-da-Costa 2015). Mažas betono tempiamasis stipris ir atsparumas pleišėjimui laikoma viena iš ker-
tinių konstrukcijų tinkamumo ribinio būvio įvertinimo problemų. Eksploatuojamo-
se gelžbetoninėse konstrukcijose plyšių susidarymas ir vystymasis yra viena pagrindinių armatūros korozijos priežasčių, kartu lemiančių ir konstrukcijų ilg-
amžiškumo bei eksploatavimo trukmės mažėjimą (Kaklauskas 2017; Kliukas
et al. 2018). Dėl mažesnio tempiamojo stiprio ir tamprumo modulio LB konst-
rukcijų tinkamumo ribinio būvio analizės problema tampa dar aktualesnė.

Dias-da-Costa *et al.* (2014) atlikti didelės apimties parametriniai tyrimai pa-
rodė, kad pastebimi apribojimai, susiję su EC2 metodo taikymu: tiek plyšių plotis,
tiek LB konstrukcinių elementų deformacijos nėra pakankamai vertinamos. Re-
zultatai, paskelbti Rumšys (2014), Carmo ir Dias-da-Costa (2015), Sin *et al.*
(2011), patvirtina minėtą išvadą. Tokios pat išvados taip pat taikytinos ir ACI
normoms. Carmo ir Dias-da-Costa (2015) modifikavo EC2 deformacijų progno-
zavimo modelį armuotam LB. Atlikta modifikacija pagerino teorinių rezultatų
prognozavimą: viršutinė deformacijų paklaidos riba lenkiamiesiems ir tempiamie-
siems LB elementas atitinkamai buvo 10 ir 15 %. Deja, atlikti tyrimai (Carmo ir
Dias-da-Costa 2015) turi apribojimų konkrečiam betonui, kurio tankis lygus
1900 kg/m³, o gniuždomasis stipris – nuo 40 iki 70 MPa.

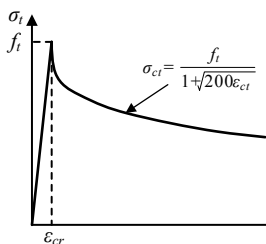
Tinkamam gelžbetoninių konstrukcijų elgsenos prognozavimui būtina tinka-
mai apsirasyti armatūros, gniuždomojo ir tempiamojo betono fizikinius modelius.
Armatūros ir gniuždomojo betono modeliavimas, taikant klasikines idealizuotas
aproksimacijas arba šiuolaikinius matematinius metodus (pvz., neuroniniai tink-
lai), dažnai nesukelia papildomų sunkumų ir reikšmingos rezultatų sklaidos. Tin-
kamumo ribinio būvio analizės srityje tempiamojo betono ir jo sąveikos su arma-
tūra modeliavimo aspektai yra vieni svarbiausių ir nuo gelžbetonio atsiradimo
pradžios iki šiol nėra iki galo išspręsti (Kaklauskas 2017). Būtina pažymėti, kad
betonas ir plieninė armatūra savo elgsena yra labai skirtingos medžiagos: jų tamp-
rumo modulis gali skirtis daugiau nei 10, o tempiamasis stipris – daugiau nei 100
kartų (Kaklauskas 2001). Inžinerinėje praktikoje tempiamojo betono fizikiniai
modeliai dažniausiai aprašomi taikant tempiamojo sustandėjimo koncepciją (angl.
tension-stiffening). Gausūs teoriniai ir eksperimentiniai tyrimai šioje srityje (Clark
ir Speirs 1978; Clark ir Cranston 1980; Williams 1986; Wollrab *et al.* 1996; Polak

ir Killen 1998; Kaklauskas 2001; Bischoff 2007; Gilbert 2007; Gribniak 2009; Rumšys 2014; Rimkus 2017) parodė, kad tempiamojo sustandėjo įtaka elemento elgsenai labiausiai priklauso nuo armavimo procento ir betono stiprio. Nevertinant šio efekto, apskaičiuotų įlinkių paklaidos, viršijus pleišėjimo apkrovą, gali siekti iki 100 % (Gilbert ir Warner 1978; Kaklauskas 2001).



1.8 pav. Esami tempiamojo sustandėjimo modeliai

Fig. 1.8. Existing tension stiffening models



Modelio modifikacijos (krentančiai daliai):

Collins ir Mitchell (1987):

$$\sigma_{ct} = \frac{f_t}{1 + \sqrt{500\epsilon_{ct}}}$$

Tamai *et al.* (1988):

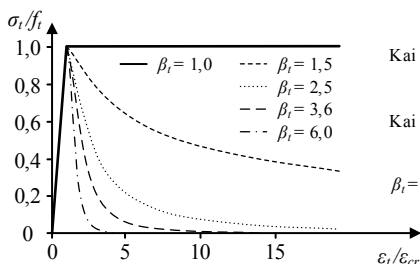
$$\sigma_{ct} = \frac{f_t}{\left(\frac{\epsilon_{ct}}{\epsilon_{cr}}\right)^{0,4}}$$

Bentz (2005):

$$\sigma_{ct} = \frac{f_t}{1 + \sqrt{3,6M\epsilon_{ct}}}; \quad M = \frac{A_c}{d_b\pi};$$

M – sukibimo parametras
 A_c – betono plotas, kuris efektyviai sukimba su armatūra
 d_b – armatūros skersmuo tempiamoje zonoje

i) Vecchio ir Collins (1986)



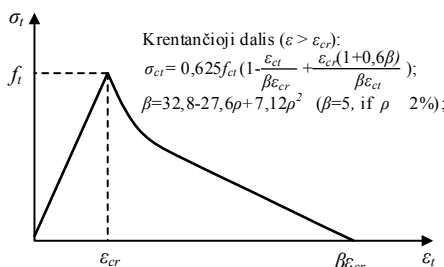
$$\text{Kai } \epsilon_t \leq \epsilon_{cr}: \sigma_t = f_{ct} \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cr}} \right);$$

$$\text{Kai } \epsilon_t > \epsilon_{cr}: \sigma_t = \frac{\beta f_{ct} \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cr}} \right)}{\beta - 1 \left(\frac{\epsilon_t}{\epsilon_{cr}} \right)^{\beta}};$$

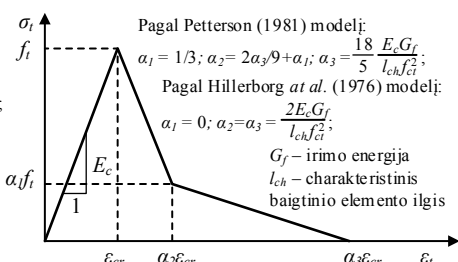
$$\beta = (\rho_t)^{x_1} (S_L c)^{x_2} (c/s)^{x_3};$$

ρ_t – armavimo procentas atmetant gniuždomą betono dalį;
 S_L – specifinis armatūros paviršiaus plotas tempiamojo betono zonoje;
 c – apsauginis betono sluoksnis;
 s – armatūros išdėstymo žingsnis;
 $x_1 = 0,3660$; $x_2 = 0,3436$; $x_3 = 0,1460$.

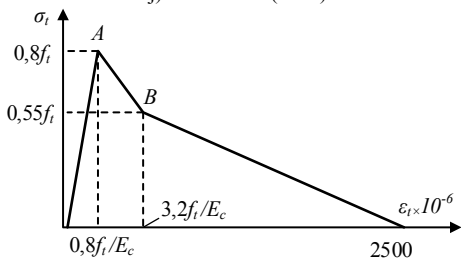
y) Cariera ir Chu (1986) and Prakhya ir Morely (1990)



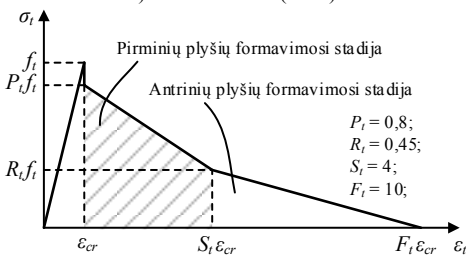
j) Kaklauskas (1999)



k) Foster ir Marti (2003)



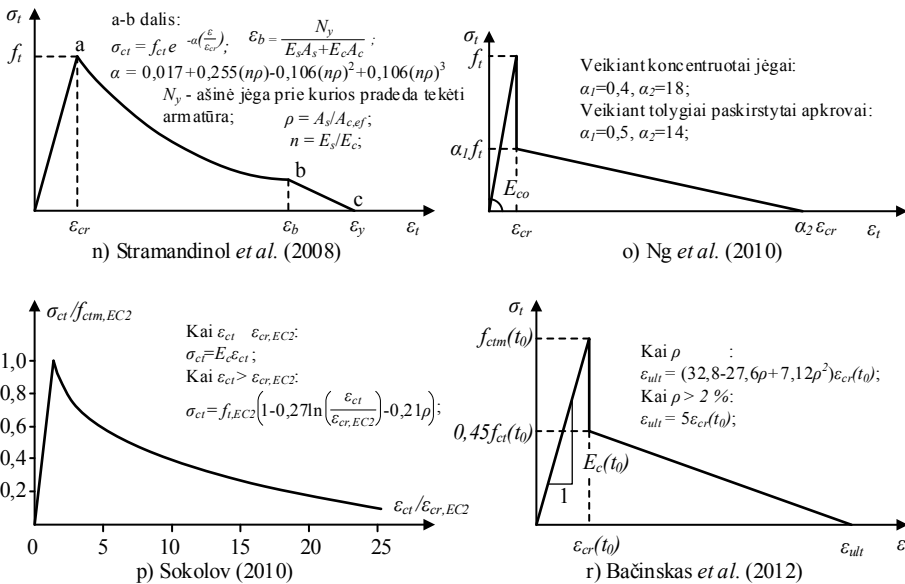
l) Beeby *et al.* (2005)



m) Nayal ir Rasheed (2006)

1.8 pav. Esami tempiamojo sustandėjimo modeliai (tęsinys)

Fig. 1.8. Existing tension stiffening models (continuation)



1.8 pav. Esami tempiamojo sustandėjimo modeliai (tęsinys)

Fig. 1.8. Existing tension stiffening models (continuation)

Vakhshouri (2017) disertacijoje apibendrina literatūroje paskelbtus tradicinio gelžbetonio elementų analizei tinkamus tempiamojo sustandėjimo modelius trumpalaikio ir ilgalaikio apkrovimo atvejais. Nuodugni modelių tyrinėjimo evoliucija pateikta ir Lietuvos tyrėjų darbuose: Kaklauskas (2001), Gribniak (2009) ir Sokolov (2010). Apibendrinti ir papildyti trumpalaikio apkrovimo tempiamojo sustandėjimo modeliai ir jų modifikacijos (Scanlon-Murray 1974; Lin ir Scordelis 1975; Vebo ir Ghali 1977; Gilbert ir Warner 1978; Scott 1983; Damjanic ir Owen 1984; Schnobrich 1985; Massicote *et al.* 1990; Vecchio ir Collins 1986; Collins ir Mitchell 1987; Tamai *et al.* 1988; Bentz 2005; Carrera ir Chu 1986; Prakhya ir Morely 1990; Kaklauskas 1999; Foster ir Marti 2003; Beeby *et al.* 2005; Nayal ir Rasheed 2006; Stramandinol *et al.* 2008; Ng *et al.* 2010; Sokolov 2010; Bačinskas *et al.* 2012) įprasto armuoto betono elementams (su plienine armatūra) grafiškai pateikti 1.8 paveiksle.

Kaip minėta, kai kurie autoriai (Sin 2011; Walraven *et al.* 1995) armuoto LB tinkamumo analizei rekomenduoja taikyti tradiciniams betonams tinkamus fizikinius modelius (1.8 pav.). Kita vertus, tiek disertacijos autoriaus, tiek kitų autorių atlikti tyrimai (Rumšys 2014; Carmo ir Dias-da-Costa 2015; Gilbert 2007) atskleidė, kad būtini papildomi išsamūs tyrimai silpnai armuotų elementų deformacijų ir pleišėjimo srityje. Tokiuose elementuose visiškai supleišėjusio skerspjuvio lenkiamasis standumas yra daug kartų mažesnis, lyginant su nesupleišėjusiu

skerspjūviu. Mažai armuotuose elementuose tempiamojo sustandėjimo efekto įtaka elemento deformacijoms yra ypač svarbi. Šioje srityje galima išskirti Kaklauskos (2001), Bischoff (2007), Gilbert (2007), Gribniak *et al.* (2013a) ir kt. atliktus tyrimus, skirtus tradicinių gelžbetoninių elementų analizei. Apibendrinant būtina pabrėžti, kad išskirtinai lengvajam betonui skirtų tempiamojo sustandėjimo efekto tyrimų disertacijos autoriui rasti nepavyko. Išsamūs tyrimai, aproksimuojant atliktų eksperimentinių tyrimų rezultatus, pateikti šiame darbe.

Dar vienas svarbus, tačiau dažnai nepaisomas aspektas tinkamumo analizėje susijęs su susitraukimo deformacijų nevertinimu stadijoje prieš apkrovimą (Kaklauskas *et al.* 2009; Kaklauskas ir Gribniak 2011). Nustatyta, kad, taikant tam tikrų mišinių sudėtis ir gamybos technologijas, tradicinio betono susitraukimo deformacijos gali išaugti iki penkių kartų (Gribniak *et al.* 2013b). Tokios pat tendencijos tinka ir LB atveju. Pirminis lengvųjų užpildų paruošimas (pagrindė įmirkimas vandenyje), vandens kiekis ir lengvojo užpildo užimamas tūris mišinyje gali būti traktuojami kaip pagrindinės charakteristikos, lemiančios susitraukimo deformacijų vertes (Wang *et al.* 2017). Elemente esanti armatūra varžo betono susitraukimą lemiantį tempimo įtempių betone atsiradimą. Suvaržyto susitraukimo poveikio derinys su santykinai mažu pleišėjimo atsparumu, lengvojo armuoto betono elementuose gerokai padidina plyšių formavimosi riziką dar iki apkrovimo (Sin 2011). Būtent šios tendencijos dažnai riboja LB taikymą realiuose statiniuose, nes dėl mažesnio tempiamojo stiprio, tamprumo modulio ir tam tikrais atvejais didesnio susitraukimo plyšiai elementuose atsiranda esant mažesniai apkrovimo lygmeniui, palyginti su analogiškais tradicinio gelžbetonio elementais.

Skaitiniai metodai

Armuto betono deformavimui aprašyti dažniausiai taikomos dvi modeliavimo koncepcijos: 1) supleišėjusio elemento būviui taikoma vidutinių deformacijų sąvoka; 2) betono pleišėjimas nagrinėjamas kaip diskretusis procesas (Jakubovskis 2015; Kaklauskas 2017). Pagrindinis pirmo tipo modelių trūkumas yra jų paprastumas – toks modeliavimas leidžia įvertinti tik vidutinį konstrukcinio elemento atsaką į tam tikro apkrovimo būdą, t. y. reali pleišėjimo prognozė neįmanoma. Nepaisant tokio griežto apribojimo, šie modeliai plačiausiai taikomi kompiuterinėse programose. Gilias vidutinio pleišėjimo modelių kūrimo tradicijas turi VGTU ekspertai. Kaklauskas (2001) pirmą kartą pasaulyje pasiūlė atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmą, kurio tempiamosios zonos fizikinis modelis sudaromas pagal gelžbetoninių sijų eksperimentiškai gautas momentų ir kreivių diagramas. Vėliau ši koncepcija pritaikyta ilgalaike apkrova veikiamų elementų (Bačinskas 2002), įtemptojo gelžbetonio elementų (Zamblauskaitė 2005), dispersiniu plaušu armuotų elementų (Ulbinas 2012), stiklo pluošto strypais armuotų elementų (Gribniak *et al.* 2013c) ir kt. elementų deformacijų analizėje.

Antro tipo modeliai realiausiai atspindi konstrukcijos pleišėjimo procesą. Jie leidžia apskaičiuoti plyšio plotį ir įvertinti bendras konstrukcijos deformacijas. Šie modeliai pagrįsti šlyties įtempių sąlyčio zonoje ir armatūros slinkties priklausomybėmis, kurios ne visuomet yra tikslios (Jakubovskis 2015; Kaklauskas 2017). Skaitinei realizacijai dažniausiai taikomas Eligehauseno *et al.* (1982) pasiūlytas betono ir armatūros sąveikos dėsnis, kuris nuo 1992 m. adaptuotas Europos betono komiteto (FIB) leidžiamame projektavimo vadove „Model Code“. Pažymėtina, kad Eligehauseno dėsnis buvo išvestas remiantis strypo ištraukimu iš betoninio kubelio, ignoruojant svarbius sąveikos parametrus: išilginį pleišėjimą, armatūros ir betono įtempių būvį, strypų išdėstymą, apsauginį betono sluoksnį, skersinį armavimą. Toks bandymo metodas leidžia palyginti skirtingų armatūros strypų sukibimą su betonu, tačiau retai atspindi realių konstrukcijų įtempių ir deformacijų būvį. Diskretaus pleišėjimo analizės metodais pagrįsti algoritmai ir fizikiniai modeliai nuodugniau apžvelgti darbuose (Jakubovskis 2015; Kaklauskas 2017). Šioje srityje galima išskirti Jakubovskio (2015) ir Juknio (2017) tyrimus, kuriuose pasiūlytas minėta koncepcija pagrįstas daugiaparametris pleišėjimo modelis. Meškėno (2018) disertacijoje modelis pritaikytas plieno plaušu armuotų elementų liekamųjų įtempių analizėje. Gudonio (2014) darbe modelis panaudotas vertinant tempiamųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būvį.

Kokybiškai nauju žingsniu vystant gelžbetonio pleišėjimo analizės skaitinius metodus galima laikyti Kaklauskos (2017) atliktus tyrimus. Jų metu pasiūlytas inžineriniu požiūriu nesudėtingas ir skaidrus gelžbetoninių elementų pleišėjimo analizės algoritmas. Pagrindinė naujo modelio idėja grindžiama vidutinio atstumo tarp pagrindinių plyšių nustatymu, taikant įtempių perdavimo ir vidutinių deformacijų darnos koncepciją. Kitaip tariant, atstumai tarp plyšių nustatyti pagal tempiamosios armatūros vidutines deformacijas, apskaičiuotas sulyginus skirtingomis koncepcijomis suformuluotas matematinės priklausomybės. Remiantis šiuo principu pasiūlytas atstumo tarp plyšių apskaičiavimo algoritmas (Kaklauskas 2017). Koncepcijos adekvatumas patvirtintas atlikus lyginamąją analizę su eksperimentinių tyrimų duomenimis ir projektavimo normų metodais gautais rezultatais. Būtina pažymėti, kad šaltinyje (Kaklauskas *et al.* 2017) pateikiama lengvojo betono sijų atstumų tarp plyšių analizė taikant minėtą algoritmą. Analizės rezultatai atskleidė, kad ši metodika tinkama armuotų LB elementų pleišėjimo parametrams vertinti. Ši koncepcija toliau tobulinama siekiant pasiūlyti bendrą ir adekvatų armuoto betono elementų plyšio pločio apskaičiavimo modelį.

Dėl nuosekliai didėjančių kompiuterių programinės ir techninės įrangos galimybių konstrukcijų skaitinei analizei dažnai taikomi baigtinių elementų (BE) metodai. Komercinės baigtinių elementų kompiuterinės programos, tokios kaip ATENA, DIANA, ANSYS, ABAQUS, siūlo dideles analitinių netiesinės gelžbetoninių elementų analizės galimybes (Peiretti *et al.* 1991; Argyris ir Kacianauskas 1996; Kaklauskas *et al.* 2004). Atlikti tyrimai parodė, kad, tinkamai įvertinus

tempiamojo sustandėjimo efektą, baigtinių elementu metodu gaunami rezultatai puikiai atitinka eksperimentinių tyrimų duomenis (Gribniak *et al.* 2007).

Apibendrinant būtina pabrėžti, kad tiek inžinerinių metodų, tiek skaitinių algoritmų atitiktis dažniausiai vertinama jais gautus rezultatus palyginus su laboratorijos sąlygomis išbandytų sumažintų matmenų elementų eksperimentinių tyrimų rezultatais. Apžvelgiant armuotų lenkiamųjų elementų, pagamintų naudojant LB tyrimus, galima išskirti šiuos darbus: Sin *et al.* (2011), Carmo *et al.* (2013), Bernardo *et al.* (2016), Shafigh *et al.* (2011b), Vengatachalapathy ir Thirugnanasambandam (2014), Dias-da-Costa *et al.* (2014), Ahmad ir Barker (1991), tačiau šių tyrimų objektai buvo sijos, kurių dydis palyginti nedidelis: ilgis svyruoja nuo 1950 iki 3600 mm. Betoniniuose elementuose esamas dydžio efektas, dėl kurio nominalusis konstrukcinis stipris ir medžiagos trapumas (santykis tarp energijos, suvartotos apkrovimo metu po ir prieš įtempių bei deformacijų piką) mažėja, didėjant tempiamo elemento dydžiui (Bažant 1984; Carpinteri 1989; Bažant ir Planas 1997). Kitaip tariant, mažo dydžio betoniniai elementai tampa plastiški, o didelio dydžio – idealiai trapūs (Syroka-Korol ir Tejchman 2014). Todėl praktiniu požiūriu svarbu žinoti, ar medžiagos modeliai gali būti taikomi daug didesnių matmenų konstrukcijoms. Todėl modelio atitiktį būtina patikrinti su natūralaus dydžio konstrukcijomis.

Wu *et al.* (2011) savo tyrimuose nagrinėjo lengvojo betono sijų dydžio efektą: buvo bandomos trys skirtingo dydžio sijos (2400 4 00 250, 3300 5 50 3 75, 4200 7 00 5 00), išlaikant tą patį tarpatramio ir skerspjuvio aukščių santykį, kuris lygus 6. Tyrimai atskleidė, kad maksimalaus įlinkio ir tarpatramio santykis mažėja, kai abiejų betono tipo (normaliojo ir lengvojo betono) sijų matmenys padidėja. Kai skerspjuvio aukštis padidėja nuo 300 iki 600 mm, normaliojo ir lengvojo betono sijų maksimalaus įlinkio ir tarpatramio santykis sumažėja 23 % ir 55 % atitinkamai. Tai reiškia, kad LB sijų maksimalaus įlinkio ir tarpatramio santykinis sumažėjimas yra aktualesnis nei normaliojo betono sijų, todėl šis klausimas lengvajam betonui tampa dar svarbesnis. Didesnio natūralaus dydžio armuoto LB konstrukcijų tyrimų atlikta nedaug. Autoriui pavyko rasti tik kelis darbus: Wu *et al.* (2011) ir Kamanli *et al.* (2012), kurių bandinių dydžiai atitinkamai buvo 4600×400×250 ir 4000×500×200 mm. Didesnių matmenų plokštės (3800 4 00 1 61 mm) tyrinėjo Vakhshouri (2017).

1.6. Pirmojo skyriaus išvados ir uždavinių formulavimas

Atlikus literatūros apžvalgą, galima teigti, kad:

1. Vienas iš pagrindinių tradicinio betono trūkumų – didelė tūrio masė, kuri dažnai riboja jo taikymą didelių gabaritų statiniams. Ši problema gali būti sprendžiama lengvinant betoną. Taikant šiuolaikinius technologinius sprendimus, atsiranda galimybė kurti sudėtis, kurių savybės yra tokios pat, o kartais ir pranašesnės, lyginant su normaliuoju betonu, o tūrio svoris iki 40 % mažesnis. Konstrukcinio lengvojo betono naudojimas statiniams turi daug privalumų. Jis turi efektyvesnę stiprio ir savojo svorio santykį, dėl to mažėja reikiamo betono ir armatūros kiekis, atsiranda galimybė statyti didesnio aukščio statinius ir mažinti pamatų įrengimo išlaidas.
2. Lengvasis betonas turi nemažai skirtumų, lyginant su normaliuoju betonu. Lengvojo betono savybės labai priklauso nuo mišiniams taikomų lengvųjų užpildų tipo, kiekio ir mechaninių savybių, taip pat nuo betono mišinių paruošimo technologijos. Šie aspektai tradiciniais inžineriniais metodais yra sunkiai įvertinami, nes buvo sukurti ilgus metus tobulintiems įprasto svorio betono mišiniams.
3. Lengvojo betono mišiniai jautresni proporcijų, sudedamųjų dalių ir drėgmės pokyčiams. Dėl didesnio matricos mišinio ir užpildo tankių skirtumo, pastarasis betonas yra lengviau išsisluoksniuojanti medžiaga. Tai lemia per didelis mišinio slankumas ar per ilgas tankinimas vibruojant. Norint išvengti tankinimo, alternatyviai galima naudoti saume sutankėjantį lengvąjį betoną.
4. Nepaisant to, kad pasaulyje statybos srityje inovatyvių inžinerinių sprendimų paieškai skirta daug teorinių ir eksperimentinių tyrimų, jų praktinį naudojimą dažniausiai riboja patikimų fizikinių modelių ir skaičiavimo metodų stoka. Lengvasis betonas – išskirtinė medžiaga, kurios savybės lemia ne tik naudojami užpildai ir priedai, bet ir mišinių gamybos technologija. Šiuo požiūriu lengvojo betono konstrukcijų analizei svarbu taikyti universalius metodus ar fizikinius modelius, leidžiančius įvertinti šios medžiagos elgsenos ypatumus visame gyvavimo cikle.
5. Inžinerinėje praktikoje armuoto lengvojo betono elementų analizei dažniausiai taikomi tie patys metodai kaip ir normaliojo betono elementams. Lengvojo betono įtaka konstrukcijos elgsenai įvertinama

papildomais empiriniais koeficientais, priklausančiais nuo tankio. Toks lengvojo betono elgsenos prognozavimas dažnai neatitinka realios konstrukcijos elgsenos. Taikant projektavimo normų metodus lengvojo betono konstrukcinių elementų deformacijos nėra pakankamai įvertinamos, o paklaidos gali siekti daugiau nei 100 %.

6. Kaip alternatyva tradiciniams inžineriniams metodams gali būti naudojami netiesiniai skaitiniai algoritmai, kuriuose taikomi fizikiniai medžiagų modeliai, atspindintys elementų elgsenos aspektus įvairiose eksploatacijos stadijose. Nors pasaulyje tradicinių gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų būvio prognozavimui pasiūlyta nemažai betono fizikinių modelių, armuoto lengvojo betono elementų skaitinei analizei fizikinių modelių nėra.

Atsižvelgus į literatūros apžvalgos išvadas, darbo tikslui pasiekti suformuluojami šie uždaviniai:

1. Naudojant skirtingus užpildus ir jų derinius, parinkti lengvojo betono mišinių sudėtis ir atlikti šių sudėčių fizikinių, mechaninių ir ilgaamžiškumo savybių eksperimentinius tyrimus.
2. Pasirinktas sudėtis pritaikyti eksperimentinių lenkiamųjų armuoto betono elementų gamybai ir išbandyti juos trumpalaikie statinė apkrova.
3. Taikant atvirkštinio uždavinio algoritmą, nustatyti supleišėjusio armuotojo tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramas, įvertinant betono susitraukimo deformacijas stadijoje prieš apkrovimą.
4. Aproximuojant gautus rezultatus, pasiūlyti armuoto lengvojo betono fizikinį modelį lenkiamųjų elementų analizei esant trumpalaikiai apkrovai.
5. Pasiūlytą modelį pritaikyti kitų autorių atliktų eksperimentinių sijų skaitinei įtempių ir deformacijų analizei, įvertinti siūlomojo modelio adekvatumą, palyginti su projektavimo normose taikomais inžineriniais metodais
6. Atlikti realaus dydžio armuoto lengvojo betono lenkiamųjų konstrukcinių elementų skaitinį modeliavimą, gautus rezultatus palyginti su rezultatais, gautais tradiciniams gelžbetoniniams elementams.

Lengvojo betono sudėties parinkimas

Šiame skyriuje aprašomi lengvojo betono sudėties parinkimo tyrimai. Tyrimus sudaro keturi pagrindiniai etapai, suskirstyti pagal mišiniams naudotus užpildus: perdirbtas plastikas, pūsto stiklo granulės, pūsto stiklo granulių ir keramzito darinys, keramzitas. Papildomai atlikti kiekvienos grupės pasirinktų mišinių reologinių ir ilgaamžiškumo savybių tyrimai. Skyriaus tematika paskelbti trys straipsniai (Rumšys *et al.* 2017a, 2017b, 2018).

2.1. Sudedamosios dalys ir savybės

Atlikta literatūros apžvalga (1 skyrius) parodė, kad LB mišiniai, naudojant mažos frakcijos užpildus (iki 9–13 mm), gamybos metu turi mažesnę išsisluoksniavimo tikimybę, pasižymi geresnėmis klojumo savybėmis, tolygesniu dalelių paskirstymu mišinyje bei atitinkamai tolygesniu vidiniu drėkinimu džiūvimo procese. Mišiniai su mažos frakcijos lengvuju užpildu pasižymi didesniu gniuždomuoju stipriu, lyginant su mišiniais, kuriuose yra didelės frakcijos užpildas. Dėl šios priežasties eksperimentiniuose tyrimuose siekiama naudoti mažos frakcijos lengvuosius užpildus, kurie pagal LST EN 13055:2016 (2016) priskiriami smulkiajai frakcijai (dalelių dydis 0–4 mm) arba būtų artimi šiai frakcijai (iki 8 mm).

Lengvasis užpildas

Eksperimentinių tyrimų pradžioje konstrukcinio lengvojo betono ($f_{cm} \geq 17$ MPa, $\rho \leq 2000$ kg/m³ (LST EN 1992-1-1:2005)) gamybai buvo ieškoma technologiniu požiūriu tinkamų ir Lietuvoje komerciškai prieinamų dirbtinių užpildų. Daug dėmesio tyrimų metu skirta iš perdirbtų atliekų pagamintiems užpildams. Tokio pobūdžio tyrimai svarbūs plėtojant beatliekės gamybos (angl. *zero waste*) koncepciją. Eksperimentiniuose tyrimuose naudoti šie lengvieji užpildai:

1. Keramzitas – klasikinis lengvasis užpildas, plačiausiai naudojamas lengvojo betono gamybai. Tai dirbtinis užpildas, gaunamas smulkintas molio daleles paveikus aukšta temperatūra ir išpučiant jas iki korėtos struktūros. Šiuose tyrimuose naudotas keramzitas Leca S, kurio frakcija – 2–4 mm. Toliau žymimas santrumpa K(2–4).
2. Pūstas stiklas – tai neorganinis lengvasis užpildas, gaminamas iš pramoninių stiklo duženų atliekų. Duženos sumalamos iki reikiamos granulometrijos ir, taikant specialią technologiją bei naudojant priemaišas, išpučiamos aukštoje temperatūroje. Tyrimuose naudotos UAB „Stikloporas“ gaminamas 0,5–1 mm frakcijos pūstas stiklas. Toliau žymimas PS(0,5–1).
3. Plastiko granulės – tai užpildas, pagamintas iš perdirbtų polietileno atliekų. Plastiką pasirinktas kaip atsvara keramzitui, t. y. užpildas, kuris beveik neįgeria vandens (skirtingai nei keramzitas). Tyrimuose naudotos kelių rūšių plastikinės granulės (HDPE MFI 2,51; HDPE MFI 0,3; LDPE trupiniai; HDPE trupiniai (pavadinimai pagal gamintoją)), pagamintos AB „Plasta“ įmonėje. HDPE reiškia didelio tankio polietileną (angl. *high density polyethylene*), LDPE – mažo tankio polietileną (angl. *low density polyethylene*). MFI nurodo plastiko lydymosi indeksą. Toliau plastikai HDPE MFI 2,51, HDPE MFI 0,3, LDPE trupiniai, HDPE trupiniai žymimi atitinkamai HDPE(2,51), HDPE(0,3), LDPE(tr) ir HDPE(tr).

Užpildų bendras vaizdas pateiktos 2.1 paveiksle. Lengvųjų užpildų pagrindinės fizinės ir mechaninės savybės pateiktos 2.1 lentelėje. Lengvųjų užpildų granulometrija nustatyta atliekant sietinę analizę pagal LST EN 993-1 bei naudojant vibracinį sietą „Haver EML 200 digital T“. Gauti rezultatai pateikti 2.2 a paveiksle.



2.1 pav. Tyrimuose naudoti lengvieji užpildai
Fig. 2.1. Lightweight aggregates used in research

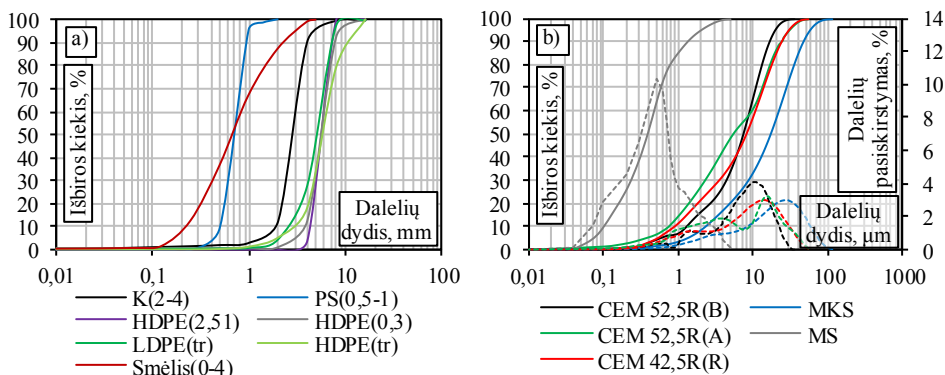
2.1 lentelė. Fizikinės ir mechaninės lengvųjų užpildų savybės

Table 2.1. Physical and mechanical properties of lightweight aggregates

Eil. Nr.	Medžiaga	Piltinis tankis, kg/m ³	Dalelių tankis, kg/m ³	Prisotintų dalelių tankis, kg/m ³	Vandens įmirkis po 24 val., %	Atsparumas trūpinimui, MPa
1	K(2–4)	488	804	1002	24,5	3,49
2	PS(0,5–1)	291	–	–	25,0	2,38
3	HDPE(2,51)	540	935	935	0,040	5,29
4	HDPE(0,3)	436	945	945	0,016	2,30
5	LDPE(tr)	286	781	781	0,290	0,62
6	HDPE(tr)	418	931	931	0,016	2,44

Smulkusis įprastas užpildas

Tyrimuose naudotas plautas 0–4 mm frakcijos smėlis iš Gariūnų karjero, kurio tankis – 2,621 g/cm³, piltinis tankis – 1,624 g/cm³. Toliau šis smėlis žymimas Smėlis(0–4). Smėlio granulometrija nustatyta taikant tą pačią metodiką kaip ir lengviesiems užpildams ir pateikta 2.2 a paveiksle.



2.2 pav. Naudotų sudedamųjų dalių granulometrija: a) lengvųjų ir įprastų užpildų; b) rišamųjų medžiagų ir mikroužpildų

Fig. 2.2. Granulometric curves: a) lightweight and ordinary aggregates; b) cement and microfillers

Mikroužpildai

Tyrimuose naudoti du skirtingi mikroužpildai:

1. Maltas kvarcinis smėlis iš Anykščių karjero (įmonės AB „Anykščių kvarcas“), kurio didžiausių dalelių dydis mažesnis nei 100 μm . Toliau žymimas MKS.
2. Silicio dioksido mikrodulkės „RW-Füller“ gaminamos „RW silicium GmbH“ įmonėje. Didžiausių dalelių dydis mažesnis nei 5 μm . Toliau žymimas MS.

Rišamoji medžiaga

Kaip rišamoji medžiaga skirtingiems tyrimams naudoti trys cementai (CEM):

1. „Aalborg“ baltas CEM I 52,5 R klasės cementas pagamintas Danijoje. Toliau žymimas CEM 52,5R(B).
2. AB „Akmenės cemento“ CEM I 52,5 R klasės cementas. Toliau žymimas CEM 52,5R(A).
3. „ROCKET M600“ CEM I 42,5 R klasės cementas pagamintas Švedijoje. Toliau žymimas CEM 42,5R(R).

Pagrindinės cementų savybės apibendrintos 2.2 lentelėje. Mikroužpildų ir cementų granulometrinė sudėtis nustatyta lazerine dalelių analizavimo mašina „Cilas Particle Size Analyzer 1090“ ir pateikta 2.2 b paveiksle.

2.2 lentelė. Cemento savybės**Table 2.2.** Properties of cement

Eil. Nr.	Cementas	Gniuždomasis stipris, MPa		Smulkumas, m ² /kg	Tikrasis tankis, g/cm ³
		7 parų	28 parų		
1	CEM 52,5R(B)	59,7	73,0	308	3,063
2	CEM 52,5R(A)	48,7	61,1	490	3,135
3	CEM 42,5R(R)	37,0	53,7	400	3,089

Superplastikliai ir reologiniai priedai

Tyrimuose naudoti trys skirtingi superplastikliai ir vienas reologiją gerinantis priedas:

1. „Castament FS-40“ miltelių pavidalo superplastiklis, kurio pagrindą sudaro polikarboksilato esteris. Toliau žymimas SP1.
2. „MC PoweFlow 1124“ skysčio pavidalo superplastiklis, kurio pagrindą sudaro polietilenglikolis. Toliau žymimas SP2.
3. „BASF ACE 430“ skysčio pavidalo superplastiklis, kurio pagrindą sudaro polikarboksilo eteris. Toliau žymimas SP3.
4. „AXILAT RH 100 XP“ miltelių pavidalo reologines savybes gerinantis ir išsisluoksniavimą mažinantis priedas. Toliau žymimas RP.

2.2. Bandymų metodika ir įranga**2.2.1. Mechaninės ir fizikinės savybės***Gniuždomasis stipris*

Visuose mišiniuose naudoti nedidelės frakcijos užpildai (iki 8 mm), dėl to gniuždomajam stipriui nustatyti naudoti 70×70×70 mm dydžio kubeliai. Suformuotų bandinių gniuždomasis stipris nustatytas hidrauliniu presu „Alpha-3-3000S“ po 7 ir 28 dienų kietėjimo. Gniuždomasis stipris nustatytas išbandžius tris bandinius.

Tempiamasis skeliamasis stipris

Tempiamasis skeliamasis stipris nustatytas pagal LST EN 12390-6:2010 standartą. Stipriui nustatyti naudotas hidraulinis presas „Tinius Olsen H200KU“ ir tam skirtas bandymo rėmas.

Tankis

Ore kietėjęs tankis nustatytas bandinio svorį padalijus iš jo tūrio. Laboratorijos sąlygomis kietėjęs bandinys pasvertas svarstyklėmis, kurių tikslumas ne mažesnis kaip 0,1 g. Tūris apskaičiuotas dauginant vidutinį (apskaičiuotą iš keturių kraštinų) bandinio plotį, aukštį ir ilgį. Ilgių matavimai atlikti slankmačiu, kurio tikslumas – 0,1 mm.

Krosnyje išdžiovinto bandinio tankis nustatytas tokiu pat principu kaip ir ore kietėjusio bandinio tankis, tačiau prieš tai bandinį išdžiovinus 105 ± 5 °C temperatūros krosnyje iki pastovios masės.

2.2.2. Ilgaamžiškumas

Šalčio atsparumas

Atsparumo šalčiui tyrimai atlikti vadovaujantis LST 1428-17:2016 standarto reikalavimais. Tyrinėtiems mišiniams pagaminta po devynis bandinius. Jie priklausomai nuo užpildo dydžio gali būti kubai, kurių kraštinės ilgis – 150 mm, 100 mm arba 70 mm. Šiuose tyrimuose pasirinkti 70 70 70 mm matmenų bandiniai. Šeši bandiniai skirti atsparumui šalčiui nustatyti, o kiti bandiniai yra kontroliniai ir išbandyti prieš pradedant atsparumo šalčiui ciklinius bandymus. Suformuoti bandiniai 1 parą kietinti formoje ir 27 paras polietileno maiše, esant 20 ± 1 °C temperatūrai ir 95 % drėgmei. Po 28 parų kietėjimo bandiniai 4 paras išmirkyti vandenyje. Po išmirkymo trys kontroliniai bandiniai per 2–4 val. išbandyti gniuždymo apkrova nustatant pradinį gniuždymo stiprį pagal LST EN 12390-3:2009. Likę bandiniai šaldomi ore ne mažiau kaip 2,5 val., esant -18 ± 2 °C temperatūrai, ir atšildomi vandens vonioje ne trumpiau kaip $2 \pm 0,5$ val. 18 ± 5 °C temperatūroje. Jeigu betono bandinių, kurių bandytas atsparumas šalčiui, gniuždymo stipris sumažėjo daugiau kaip 5 %, lyginant su kontrolinių bandinių gniuždymo stipriu, tariama, kad betono atsparumas šalčiui po tam tikro ciklų skaičiaus yra nepakankamas.

Šarminė korozija

Betono šarminei korozijai nustatyti taikytas pagreitintas AAR-2 metodas pagal Nixon ir Sims (2016) pasiūlytą metodiką, kuri kartu įtraukta RILEM rekomendacijose. Tyrimams naudotos $40 \times 40 \times 160$ mm prizmės, kurios šioje metodikoje dar vadinamos trumpos storos (angl. *short thick*). Prizmės buvo betonuotos specialiose formose. Bandinių galuose įtvirtinami šarmų poveikiui atsparūs metaliniai reperiai. Po 24 val. kietėjimo 20 °C temperatūros ir 95 % santykinės drėgmės aplinkoje bandiniai išformuoti ir įmerkti į 80 ± 2 °C temperatūros indą su vandeniu bei 24 val. laikyti „Venticell“ krosnyje užtikrinančioje pastoviąją 80 ± 2 °C temperatūrą. Išlaikyti bandiniai buvo išimti ir, jiems nespėjus atvėsti, buvo išmatuoti jų pradiniai ilgiai. Matavimams naudotas specialus stendas ir 1 µm tikslumo „Mitutoyo Absolute“ komparatorius. Atlikus matavimus, bandiniai įdėti į 1 M natrio

hidroksido (NaOH) tirpalo pripildytą vonią ir laikyti 28 paras palaikant 80 ± 2 °C temperatūrą. Būtina pabrėžti, kad pagal RILEM rekomendacijas bandymo trukmė turi būti 14 parų, tačiau, siekiant gauti patikimesnius rezultatus, bandymo trukmė prailginta dvigubai. Tarpiniai ilgio matavimai atlikti periodiškai, išlaikius bandinius 2, 5, 7, 14, 21 ir 28 paras.

Šarminės korozijos poveikis apibūdinamas santykinio pailgėjimu, kurio rekomenduojama ribinė reikšmė po 14 bandymo dienų turėtų neviršyti 0,1 % (Nixon ir Sims 2016). Nixon ir Sims (2016) papildomai rekomenduoja 0,75–0,8 korekcijos koeficientą duomenims, gautiems naudojant „trumpas storas“ prizmes. Atsižvelgiant į bandinių formą ribinės pailgėjimų vertės sumažėja iki 0,075–0,08 %.

Vandens įgeriamumo markės nustatymas

Vandens įgeriamumo markė nustatyta pagal LST 1974:2012 O priedą. Tyrimuose naudoti Ø150 mm skersmens cilindrai, kurių aukštis priklauso nuo stambiausiojo užpildo dydžio. Dėl bandymuose naudotų nedidelės frakcijos užpildų pasirinktas 30 mm aukštis. Bandiniai buvo hermetiškai įstatyti į bandymo stendą ir vandens slėgis lizduose po apatiniais bandinių galais didintas pakopomis kas 0,2 MPa laiko intervale nuo 1 min iki 5 min. Kiekviename lygmenyje pastovusis slėgis išlaikytas 4 val. Bandinio nelaidumas vandeniui vertinamas didžiausiuoju slėgiu, kuriam esant vanduo nepersisunkė per bandinį.

Susitraukimas

Kiekvieno mišinio susitraukimo deformacijoms nustatyti pagaminta po tris $400 \times 100 \times 100$ mm matmenų betoninės prizmės. Matavimai pradėti išformavus bandinius. Deformacijos matuotos 1 µm tikslumo skaitmeniniu komparatoriumi „Demec“ 200 mm matavimų bazėje.

2.2.3. Mišinių paruošimas ir laikymo sąlygos

Mišiniai su plastiko užpildu

Betono mišiniai paruošti 20l „Hobart“ tipo planetarine maišykle. Pirmajame etape sumaišyti visi mišinio komponentai, išskyrus lengvąjį užpildą. Antrajame etape, į išmaišytą mišinį sudėtas užpildas ir dar kartą išmaišytas. Trečiajame etape, nstabdant maišyklės, supiltas vanduo su skystu superplastikliu ir mišinys maišytas iki vientisos konsistencijos.

Mišiniai su pūsto stiklo užpildu

Betono mišiniai paruošti naudojant 12 l tūrio „Hobart“ tipo maišyklę. Mišiniai gaminti tokia principine seka: į maišymo indą supiltos visos kietosios medžiagos ir miltelių pavidalo superplastiklis. Pamačius tolygiai supiltas vanduo su skystu superplastikliu ir mišinys maišytas iki vientisos konsistencijos.

Mišiniai su kombinuotu pūsto stiklo ir keramzito užpildu

Mišiniams paruošti taikyta tokia pati metodika kaip mišiniams su pūsto stiklo užpildu. Išsisluoksniavimo tikimybei sumažinti prieš maišymą lengvieji užpildai 1 val. uždarame konteineryje papildomai drėkinti vandens kiekiu, lygiu 15 % nuo užpildo masės. Drėkinimo vanduo į V/C santykio skaičiavimą neįtrauktas.

Mišiniai su keramzito užpildu

Visi mišiniai maišyti maišykle „Matec“. Prieš maišant, lengvasis užpildas K(2–4) sudrėkintas 20 % vandens kiekiu nuo keramzito masės ir laikytas 1 val. uždarame konteineryje iki maišymo pradžios. Technologinio proceso pradžioje išmaišytos visos sausosios medžiagos, tuomet dedamas sudrėkintas keramzitas ir reologinis priedas, viską išmaišius supilamas vanduo, sumaišytas su superplastikliu. Maišoma iki vientisos konsistencijos.

Bandinių laikymo sąlygos

Mišiniai buvo kloti į metalines formas netankinant, apdengti plėvele ir palikti kietėti vieną parą natūraliomis sąlygomis. Po paros bandiniai išformuoti, sudėti į polietileno maišus ir iki bandymo dienos kietinti $20 \pm 1,0$ °C temperatūroje.

2.2.4. Reologinės savybės

Mini kūgio slankumo bandymas

Bandymui atlikti naudotas kūgis (2.3 a pav.), kurio apatinis skersmuo – Ø100 mm, viršutinis – Ø70 mm, aukštis – 60 mm. Bandymas atliekamas pastatant kūgį ant stiklinės plokštelės. Kūgis visiškai užpildomas betonu ir paskui pakeliamas leidžiant betonui ištekti. Nustojus betonui tekėti, dviem statmenomis kryptimis milimetro tikslumu išmatuojamas ištekęsio betono mišinio pasiskirstymo skersmuo, o šių dydžių vidurkis imamas kaip slankumo ir sklidumo vertė.

J žiedo bandymas

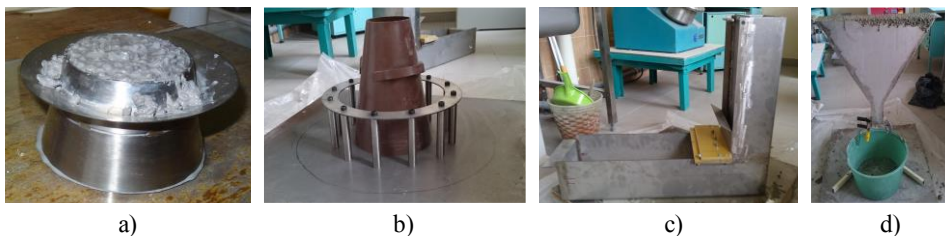
J žiedo bandymai atlikti pagal LST EN 12350-12:2010 standartą naudojant plataus tarpo žiedą (angl. *wide gap J-ring*) (2.3 b pav.), įprastą slankumo kūgį ir metalinį pagrindą su nubrėžtu 500 mm skersmens apskritimu. Kūgis ir J žiedas pastatomi nubrėžto apskritimo centre. Kūgis visiškai užpildomas betonu, jam leidžiama pastovėti 30 s ir tada per 1–3 s kūgis pakeliamas vertikaliai. Keliant laikas pradedamas skaičiuoti iki tol, kol tekantis betonas pasiekia nubrėžto apskritimo liniją. Užrašomas t_{500J} laikas. Betonui nustojus tekėti, išmatuojamas atstumas žiedo centre nuo žiedo viršaus iki betono viršaus, taip pat keturiose vietose (sudalijant žiedą į 4 dalis po 90°) žiedo išorėje už vertikalių strypelių. Pagal standarte pateiktą formulę, kuri įvertina aukščių skirtumą žiedo centre ir išorėje už vertikalių strypelių, apskaičiuojamas pratekėjimą įvertinantis dydis *PJ* (angl. *passing ability PJ*).

L dėžės bandymas

L dėžės (2.3 c pav.) bandymai atlikti pagal LST EN 12350-10:2010 standartą naudojant trijų strypų kliūtį (angl. *three bar test*). Vertikaliąją L dėžės dalį, sandariai atskirtą, nuo horizontaliosios dalies pakeliama metaline plokšte. Už šios plokštelės lygiagrečiai su ja išdėstyti trys Ø12 mm strypai, imituojantys kliūtis betonui tekėti. Vertikaliąją dėžės dalį visiškai pripildoma betonu ir laikoma 60 s. Tuomet visiškai ištraukiama metalinė plokštelė, skirianti vertikaliąją ir horizontaliąją dėžės dalį, leidžiant betonui tekėti tol, kol nebepastebimas jo judėjimas. Išmatuojamas betono aukštis horizontaliosios dalies gale ir betono aukštis vertikaliuosio dėžės dalyje. Šių aukščių santykis apibūdinamas kaip pratekėjimą įvertinantis dydis *PL* (angl. *passing ability PL*).

V piltuvo bandymas

V piltuvo (2.3 d pav.) bandymai atlikti pagal LST EN 12350-9:2010 standartą. Piltuvo apačioje esantys varteliai sandariai uždaromi ir piltuvas pilnai pripildomas betonu. Po 10 ± 2 s varteliai atidaromi ir pradedamas skaičiuoti betono tekėjimo laikas. Laikas nustojamas skaičiuoti tada, kai, vertikalieji žiūrint iš viršaus į piltuvą, jau matomas indas, į kurį teka betonas. Užrašomas betono ištekėjimo laikas t_v , sekundėmis.



2.3 pav. Bandymo įranga: a) mini kūgis; b) J žiedas; c) L dėžė; d) V piltuvas
Fig. 2.3. Testing equipment: a) Mini cone; b) J-ring; c) L-box; d) V-funnel

2.3. Bandymų rezultatai

Kuriant lengvojo betono sudėtis, sudaryta eksperimentinių tyrimų programa. Iš viso suformuoti 44 skirtingi savaime tankėjantys mišiniai. Bandymo programa susideda iš 6 etapų. Keturi iš jų susiję su mišinių su skirtingais lengvaisiais užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimais. Penktajame ir šeštajame etapuose nagrinėtos tolesniems tyrimams pasirinktų mišinių reologinės ir ilgaamžiškumo savybės.

2.3.1. Mišinių su skirtingais plastiko užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai

Šių tyrimų metu siekta gauti kuo didesnius betono mechaninius rodiklius naudojant vienodą matricos mišinio sudėtį. Tyrimų tikslas – ištirti įvairių formų HDPE ir LDPE plastikinių atliekų įtaką mechaninėms betono savybėms. Savybėms palyginti naudoti betono mišiniai su tokiu pat tūriniu keramzito užpildu kiekiu. Papildomai tirta, kaip užpildų vandens absorbcija lemia betono vandens įgėriamumą.

Tyrimuose plastikas (HDPE ir LDPE) pasirinktas kaip įprastai LB mišinių gamybai naudojamo keramzito alternatyva. Keramzitas – poringa vandenį įgėrianti medžiaga. Gaminant lengvuosius betonus su poringais užpildais pastebima, kad mišinio reologinės savybės priklauso nuo individualių užpildo vandens įgėriamumo savybių. Betonai su tokiais užpildais pasižymi sunkesniu transportavimu pumpuojant, nes, padidėjus slėgiui, dalis vandens patenka į lengvojo užpildo poras, o, esant jo trūkumui, betonas netenka plastikinių savybių. Daugumos plastikų tankis atitinka reikalavimus, keliamus lengvajam užpildui ir jų vandens absorbcija yra maža.

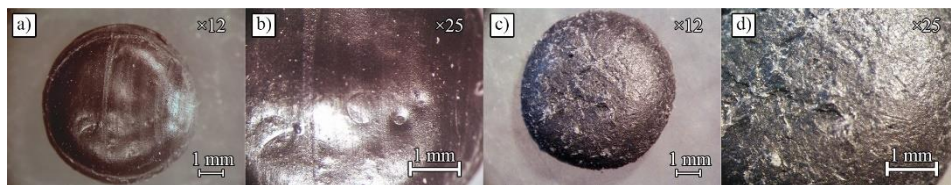
Tyrimams pasirinkti HDPE(2,51), HDPE(0,3), LDPE(tr) ir HDPE(tr) plastikai (2.1 pav., 2.1 lentelė). Papildomai dalis HDPE(2,51) plastiko užpildo buvo apdorota mechaniškai, norint pašiuškštinti plastiko paviršių dėl galimai geresnio užpildo ir cementinio skiedinio sukibimo. Apdorojimas vyko 5 min, maišykle „Eirich R02E“ maišant plastiko užpildą su 0–4 mm smėliu santykiu 2:1. Vėliau plastiko užpildas atskirtas nuo smėlio sijojant. Pradinis ir mechaniškai apdorotas plastiko užpildas pateiktas 2.4 paveiksle. Mechaniškai apdorotas užpildas lentelėse ir paveiksluose žymimas HDPE(2,51)*.

Tyrimų metu iš viso buvo suformuota 12 skirtingų mišinių: iš jų 10 – su plastiko užpildu ir 2 – atskaitiniai mišiniai su keramzito užpildu (prieš maišant betoną, keramzitas buvo sudrėkintas 10 % vandens kiekiu nuo jo masės). Mišinio sudėtys pateiktos 2.3 lentelėje. Cementinio mišinio sudėtis visais atvejais išliko vienoda, tačiau skyrėsi mikroužpildai: vienu atveju naudotas maltas kvarcinis smėlis (MKS), kitu – silicio dioksido mikrodulkės (MS). Visuose mišiniuose naudotas dviejų superplastiklių derinys: 0,5 % SP1 ir 3,0 % SP2 nuo cemento masės. Vandens ir cemento santykis (V/C) mišiniuose išlaikytas 0,25. Plastiko užpildų kiekiai parinkti priklausomai nuo jų dalelių tankio skirtumo su keramzitu. Kaip rišamoji medžiaga naudotas „Aalborg“ baltas CEM I 52,5 R klasės cementas (CEM 52,5R(B)).

Gniuždomasis betono stipris nustatytas pagal 2.2.1 skirsnyje aprašytą metodiką po 7 ir 28 parų kietėjimo. Po 2, 7, 14 ir 28 parų buvo matuojamas ultragarso sklaidimo greitis (USG), kurio metodika ir rezultatai nuodugniau aprašyti publikacijoje Rumšys *et al.* (2017).

2.3 lentelė. Lengvojo betono mišinių su plastiko užpildu sudėtys**Table 2.3.** Mix compositions of lightweight concrete with plastic aggregate

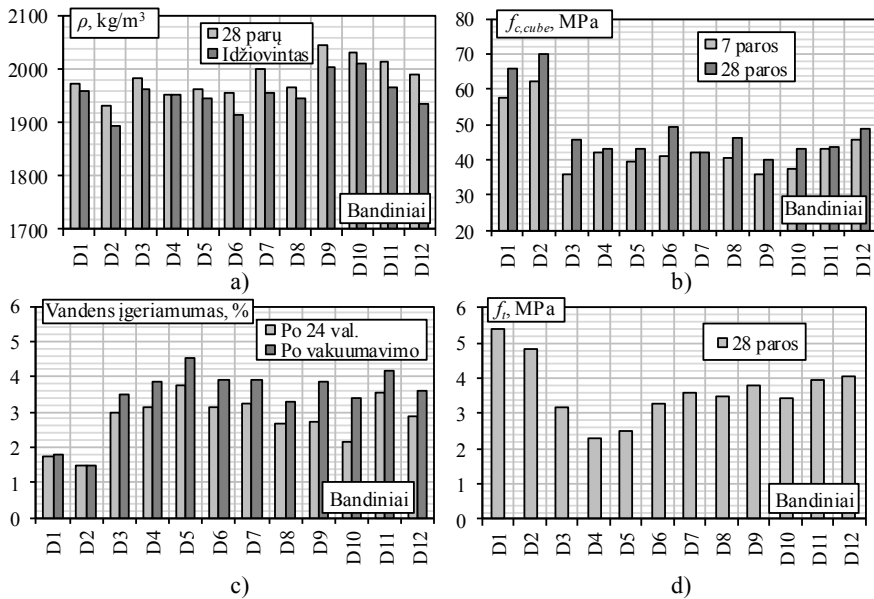
Eil. Nr.	Žymuo	Užpildo tipas	Kiekis, kg/m ³					$f_{c,cubes}$ MPa	ρ , kg/m ³
			CEM	MS	MKS	Smėlis	Užpildas		
1	D1	K(2-4)	600	–	66	1000	250	66,1	1975
2	D2			66	–			70,2	1932
3	D3	HDPE(2,51)		–	66		269	45,9	1983
4	D4			66	–			43,3	1954
5	D5	HDPE(2,51)*		–	66			43,1	1964
6	D6			66	–			49,2	1955
7	D7	HDPE(0,3)		–	66		273	42,3	2002
8	D8			66	–			46,0	1965
9	D9	LDPE(tr)		–	66		223	40,0	2044
10	D10			66	–			43,2	2032
11	D11	HDPE(tr)		–	66		253	43,5	2016
12	D12			66	–			49,0	1990

**2.4 pav.** HDPE(2,51) užpildo vaizdai, gauti elektroniniu mikroskopu: a) ir b) pirminis; c) ir d) mechaniškai apdorotas**Fig. 2.4.** Microscopic view of HDPE(2,51) aggregate: a) and b) primary; c) and d) mechanically treated

Bandiniams taip pat nustatytas tankis, vandens įgeriamumas pagal LST EN 1097-6:2013 neapsaugant bandinių paviršių derva. Papildomai atliktas vandens įgeriamumo matavimas vakuumuojant bandinius inde su vandeniu, veikiant 0,027 MPa slėgiui. Slėgis tolygiai didintas iki minėtos vertės 5 min, tada 20 min išlaikytas pastovus slėgis, 5 min mažintas iki natūralaus slėgio. Šis ciklas pakartotas tris kartus. Po vakuumavimo bandymo atliktas tempiamojo skeliamojo stiprio nustatymo bandymas.

Visų bandinių tankiai po 28 parų kietėjimo ir džiovinimo pateikti 2.5 a paveiksle. Pažymėtina, kad bandinių serija su MS mikroužpildais (D2, D4, D6, D8, D10, D12) turi mažesnę tankį. Tai galima paaiškinti tuo, kad, esant tam pačiam V/C santykiui, bandinių su silicio dioksido mikrodulkėmis mišiniai yra klampesni

ir maišant įtrauktas oras nepasišalina. Didžiausias tankis po 28 parų pastebėtas bandinių su LDPE(tr) užpildu (D9 – 2044 kg/m³, D10 – 2031 kg/m³), žemiausias bandinių tankis nustatytas su keramzito užpildu (D1 – 1975 kg/m³, D2 – 1932 kg/m³).



2.5 pav. Bandinių su plastikų užpildu savybės: a) tankis; b) gniuždomasis stipris; c) vandens įgeriamumas; d) tempiamasis skeliamasis stipris

Fig. 2.5. Properties of specimens with plastic aggregate: a) density; b) compressive strength; c) water absorption; d) splitting-tensile strength

Bandinių gniuždomojo stiprio vertės priklausomai nuo kietėjimo laiko pa-vaizduotos 2.5 b paveiksle. Nustatyta, kad po 28 dienų kietėjimo visų betono bandinių gniuždomasis stipris viršijo 40 MPa ir beveik kiekvienos bandinių serijos tankis buvo mažesnis nei 2000 kg/m³. Gautos savybės leidžia teigti, kad sukurti mišiniai atitinka konstrukcinį lengvąjį betoną. Bandinių su plastiko užpildu gniuždomasis stipris yra mažesnis nei 50 MPa, bandinių serija su keramzitu ir MS – 70,2 MPa, o bandinių su MKS mikroužpildu – 66,1 MPa. Bandinių stiprio sumažėjimas, naudojant plastiko atliekas, paaiškinamas adhezinės jėgos sumažėjimu tarp plastiko ir cementinės pastos sąlyčio zonos. Bandinys D6 su mechanškai apdorotu HDPE(2,51) užpildu ir silicio dioksido mikrodulkių mikroužpildu pasižymi didžiausiu gniuždomuoju stipriu tarp bandinių su plastiko užpildu ir siekia 49,2 MPa. Panašūs rezultatai pastebėti ir betone su HDPE(tr): bandinių serijos D12 gniuždomasis stipris – 49 MPa. Apibendrinant, mišiniuose su plastiko

užpildais gniuždomieji stipriai gauti nuo 40 iki 49,2 MPa ($70 \times 70 \times 70$ mm), o tankis po 28 parų svyravo nuo 1954 iki 2044 kg/m³. Bandiniai su plastiko užpildu gniuždymo metu pasižymėjo plastiškąja irtimi, o bandiniai su keramzito užpildu – trapiąja. Siekiant įvertinti veiksnius, kurie turi įtakos bandinių gniuždomajam stipriui, atlikti vandens įgeriamumo ir tempiamojo skeliamojo stiprio, vakuumavus bandinius, bandymai. Gauti rezultatai pateikti 2.5 c ir d paveiksluose.

Vandens įgeriamumo tyrimo rezultatai parodė, kad bandinių su keramzito užpildu (poringas užpildas, kuris įgeria vandenį) vandens įgeriamumas yra perpus mažesnis nei bandinių su plastiko užpildu (užpildas, kurio vandens įgeriamumas nereikšmingai mažas). Taip pat paaiškėjo, kad bandinių vandens įgeriamumas labai priklauso nuo naudojamų mikroužpildų ir dažniausiai yra mažesnis naudojant MS. Šiuo požiūriu išskirtinis yra D3 bandinys su MKS mikroužpildu, kurio vandens įgeriamumas yra mažesnis už D4 bandinio su MS mikroužpildu. Vandens įgeriamumas vakuume parodė dar didesnę skirtumą tarp bandinių su keramzito ir plastiko užpildais. D1 ir D2 serijų bandinių vandens įgeriamumas padidėjo atitinkamai 0,05 % ir 0,1 %, o bandinių serijos D3–D12 – nuo 0,51 % iki 1,25 %. Tarp bandinių su plastiko užpildais didžiausias vandens įgeriamumo augimas pastebėtas didžiausio tankio bandiniuose D9 ir D10 su LDPE(tr) užpildu.

Atlikti tempiamojo skėlimo bandymai leidžia įvertinti užpildo ir cementinio skiedinio adhezinės savybės. D1 ir D2 bandinių serijos su keramzito užpildu suiro trapiai, o skėlimo plokštuma perėjo kiaurai užpildą. Keramzito dalelės neatsiskyrė nuo cementinio skiedinio ir šių mišinių tempiamoji skeliamoji jėga gauta didžiausia. D1 bandinių serijos su MKS mikroužpildu tempiamasis skeliamasis stipris gautas 5,38 MPa. Po skėlimo bandymo bandiniuose buvo matomas vandens įsiskverbimo gydis, kuris siekė apie 8 mm visose bandinio pusėse ir apie 16 mm netoli kraštų. Bandinių serijos D3 ir D4 su plastiko užpildu buvo įmirkusios vienodai. Po skėlimo bandymo užpildai nebuvo pažeisti ir lengvai atskiriami nuo cementinio skiedinio. Bandiniams su HDPE(2,51) užpildu gautos mažiausios tempiamojo skeliamojo stiprio reikšmės.

2.3.2. Mišinių su pūsto stiklo užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai

Tyrimuose atlikta lengvojo betono mišinių analizė naudojant pūsto stiklo ir keramzito užpildus. Tyrimais pirmiausia norėta išsiaiškinti gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybes naudojant mažos frakcijos (0,5–1 mm) pūsto stiklo užpildą bei palyginti šias priklausomybes su gautomis, naudojant didesnės frakcijos (2–4 mm) keramzito užpildą. Tyrimuose naudotas AB „Akmenės cemento“ CEM I 52,5 R klasės cementas. Visuose mišiniuose naudotas dviejų superplastiklių derinys: 0,5 % SP1 ir 3,0 % SP2 nuo cemento masės. Lengvųjų savaime sutankėjančių betonų sudėtys suskirstytos į grupes pagal naudojamą lengvąjį užpildą. Visuose

mišiniuose esantis smėlis turiškai (8,5; 16,7; 33,3; 66,7 ir 100 % nuo smėlio tūrio) buvo keičiamas lengvuju užpildu išlaikant vienodą matricos mišinio sudėtį. Kiekvienoje bandinių grupėje naudoti skirtingi mikroužpildai – MKS arba MS. Užbetonuoti ir etaloniniai įprasto tankio betono bandiniai su skirtingais mikroužpildais. Iš viso suformuota 18 skirtingų mišinių (2.4 lentelė). Šių mišinių grupės sudarė:

1. Atskaitiniai mišiniai be lengvojo užpildo, bet su skirtingais mikroužpildais (S1 ir S2).
2. Betono mišiniai, kuriuose naudotas pūsto stiklo 0,5–1 mm užpildas ir skirtingas mikroužpildas (PS1–PS10).
3. Betono mišiniai, kuriuose naudotas 2–4 mm keramzitas ir skirtingas mikroužpildas (K1–K6).

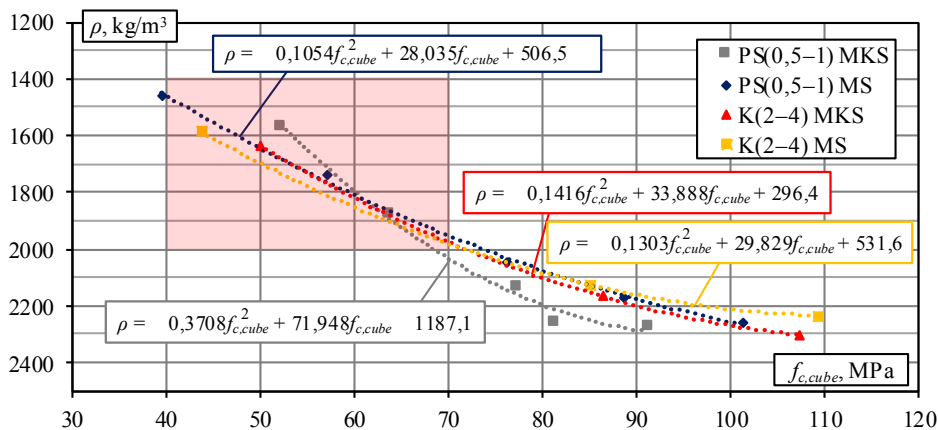
2.4 lentelė. Lengvojo betono su pūstu stiklu sudėtys

Table 2.4. Mix compositions of lightweight concrete with expanded glass

Eil. Nr.	Žymuo	Užpildo tipas	Kiekis, kg/m ³					V/C	$f_{c,cubes}$ MPa	ρ , kg/m ³
			CEM	MS	MKS	Smė- lis	Užpil- das			
1	S1	–	845	–	95	1410	–	0,25	92,8	2348
2	S2			95	–				102,5	2333
3	PS1	PS(0,5–1,0)	845	–	95	1290	23	0,25	91,4	2278
4	PS2			95	–				101,4	2258
5	PS3			–	95	1175	45		81,5	2258
6	PS4			95	–				88,9	2171
7	PS5			–	95	940	90		77,4	2138
8	PS6			95	–				76,3	2047
9	PS7			–	95	470	180		63,7	1877
10	PS8			95	–				57,2	1743
11	PS9			–	95	–	270		52,3	1569
12	PS10			95	–				39,5	1458
13	K1	K(2–4)	845	–	95	1293	33	0,27	107,4	2302
14	K2			95	–				109,4	2235
15	K3			–	95	940	130		86,4	2167
16	K4			95	–				85,2	2127
17	K5			–	95	–	389		50,0	1637
18	K6			95	–				43,8	1588

Atlikus tyrimus nustatyta, kad mišiniuose PS(0,5–1) užpildu ir MKS mikroužpildu gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų kito nuo 52,3 iki 91,4 MPa. Atitinkamai tankis priklausomai nuo pakeisto smėlio kiekio kito nuo 1569 iki 2278 kg/m³. Mišiniuose su PS(0,5–1) užpildu ir MS gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų kito 39,5–101,4 MPa, o tankis – 1458–2258 kg/m³. Mišiniuose su K(2–4) užpildu ir MKS gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų kito 50,0–107,4 MPa, o tankis – 1637–2302 kg/m³. Mišiniuose su K(2–4) užpildu ir MS gniuždomasis stipris po 28 kietėjimo parų kito 43,8–109,4 MPa, o tankis – 1588–2235 kg/m³. Visų sudėčių bandinių po 28 parų kietėjimo gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybės pateiktos 2.6 paveiksle.

Gauti rezultatai rodo, kad, esant tam pačiam cemento kiekiui, V/C santykiui ir mikroužpildui (tai pačiai matricos mišinio sudėčiai), taip pat tam pačiam bendram smėlio ir lengvojo užpildo tūriui, mišiniams su skirtingais lengvaisiais užpildais gaunamos panašios gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybės. Išskirtinė kreivė gauta naudojant bandinius su pūstu stiklu ir MKS mikroužpildu (kreivė PS(0,5–1) MKS). Šią kreivę lyginant su kitomis pastebima, kad, esant gniuždomajam stipriui, mažesniai nei 63 MPa, gaunamas mažesnis betono tankis, o viršijus 63 MPa, tankis ima didėti. Apibendrinus rezultatus nustatyta, kad, norint gauti konstrukcinius LB su PS(0,5–1) ir K(2–4) lengvuju užpildu (2.6 pav. pažymėta rausvai sritis), mišiniuose ne mažiau kaip 67 % smėlio tūrio reikia pakeisti tokiu pat lengvojo užpildo tūriu.



2.6 pav. Mišinių su skirtingais lengvaisiais užpildais ir skirtingu mikroužpildu gniuždomojo stiprio bei tankio priklausomybės

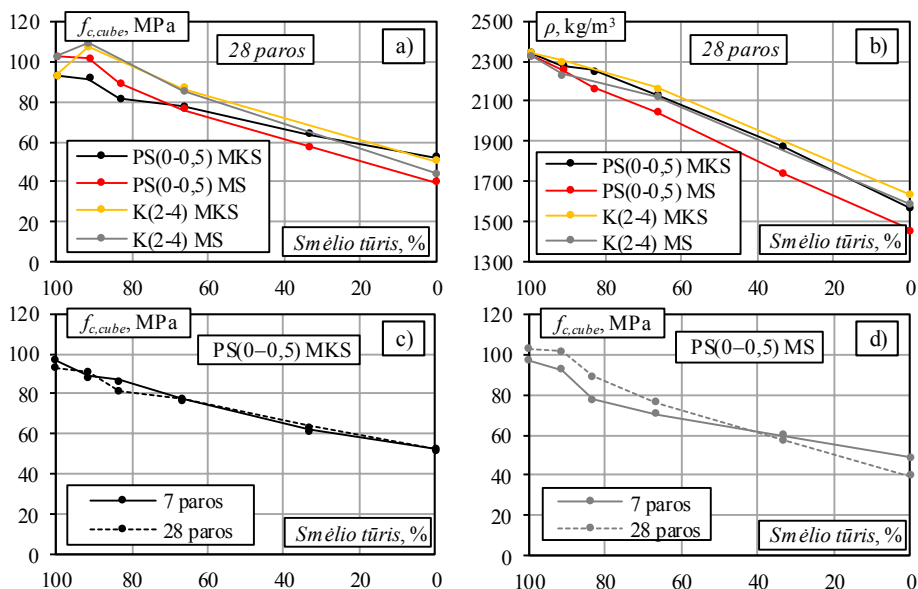
Fig. 2.6. Compressive strength and density relationship of mixes with different lightweight aggregate and different microfiller

Papildomai 2.7 paveiksle pateiktos mišinių su skirtingais lengvaisiais užpildais ir mikroužpildais priklausomybės nuo smėlio tūrio mišinyje pakeitimo lengvuju užpildu. Iš 2.7 a paveikslo matyti, kad mišinių PS(0,5–1) su MKS ir MS mikroužpildais gniuždomieji stipriai mažėja, didėjant lengvojo užpildo tūriui mišinyje. Mišiniuose su keramzitu (K(2–4)) 8,5 % smėlio tūrio pakeitus lengvuju užpildu, pastebima, kad auga gniuždomasis stipris. Lyginant su etaloniniais mišiniais S1 ir S2, mišinių K1 ir K2 gniuždomieji stipriai padidėjo atitinkamai 15,7 % ir 6,7 %. Būtina pažymėti, kad šiame tyrimų etape lengvasis užpildas prieš maišant betoną nebuvo iš anksto drėkintas. Dėl šios priežasties maišymo metu K(2–4) užpildas sugėrė daugiau vandens iš mišinio nei PS(0,5–1). Šiuo vandeniu kietėjantis betono mišinys buvo drėkinamas iš vidaus, taip pagerinant cemento hidratacijos procesą bei atitinkamai gaunant didesnę gniuždomąją stiprį. Šias tendencijas patvirtina ir tai, kad abiejų lengvųjų užpildų vandens įgeriamumas po 24 val. yra panašus (keramzito – 24,5 %, pūsto stiklo – 25,0 %, (2.1 lentelė)), tačiau labai skiriasi užpildo piltiniai tankiai (K(2–4) 488 kg/m³, PS(0,5–1) 291 kg/m³ (2.1 lentelė)). Lengvuju užpildu pakeitus daugiau nei 8,5 % smėlio tūrio, visų mišinių tendencijos panašios – gniuždomasis stipris mažėja didėjant lengvojo užpildo kiekiui. Kita vertus, mažėja ir mišinių tankis. Mažiausi gniuždomieji stipriai pastebimi PS(0–0,5) MS mišiniuose, tačiau šių mišinių tankis (2.7 b pav.) taip pat mažiausias. Kitų mišinių tankio mažėjimas, didinant lengvojo užpildo kiekį, labai panašus: K(2–4) MKS tankis kiek didesnis už likusius mišinius, o PS(0–0,5) MKS ir K(2–4) MS mišinių tankiai yra vienodi. Pakeitus 66,7 % smėlio tūrio lengvuju užpildu, didžiausi gniuždomieji stipriai gaunami mišinių su keramzito užpildu (K(2–4) MKS ir K(2–4) MS). Pakeitus 100 % smėlio tūrio, didžiausias gniuždomasis stipris (52,3 MPa) gautas PS(0–0,5) MKS bandinių. Šiek tiek mažesnis gniuždomasis stipris (50,0 MPa) gautas K(2–4) MKS bandinių. Tai parodo, kad lengvieji betonai su MKS mikroužpildu pasižymi didesniu stipriu, lyginant su betonais su MS mikroužpildu.

Mišinių su PS(0–1,0) užpildu ir MKS mikroužpildu gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo lengvojo užpildo kiekio po 7 ir 28 parų kietėjimo lyginama 2.7 c paveiksle. Pastebima tendencija, kad gniuždomasis stipris po 7 parų praktiškai toks pat kaip ir po 28 parų. Tokį pat efektą savo tyrimuose pastebėjo ir Yu *et al.* (2013). Analogiškai palyginta ir mišinių su PS(0–1,0) ir MS mikroužpildu priklausomybė nuo lengvojo užpildo kiekio (2.7 d pav.). Šiame paveiksle galima pastebėti kiek kitokias tendencijas. Pakeitus 66,7 % smėlio tūrio lengvuju užpildu po 28 parų kietėjimo gniuždomasis stipris sumažėja 4 %, lyginant su gniuždomuoju stipriu po 7 parų. Smėlį visiškai pakeitus lengvuju užpildu, 28 parų gniuždomasis stipris sumažėja 19,4 %, lyginant su gniuždomuoju stipriu po 7 parų. Stiprio sumažėjimą galima paaiškinti didesnėmis betono susitraukimo deformacijomis iki apkrovimo (lyginant su normaliojo betono bandiniais). Dėl didelių susitraukimo deformacijų kai kuriuose bandiniuose galbūt atsirado vidinių

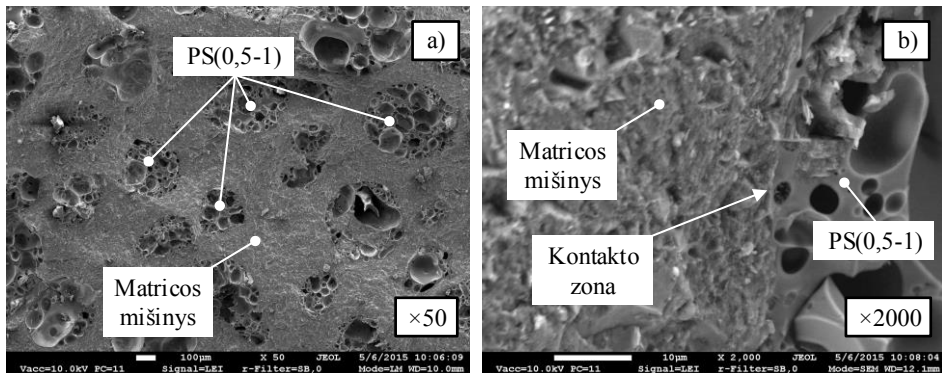
mikroplyšių, lemiančių gniuždomojo stiprio sumažėjimą. Iš 2.7 c ir d paveikslų matyti, kad šis efektas labiau pasireiškė bandiniams su MS mikroužpildu.

Siekiant stebėti užpildo ir matricos mišinio sąlyčio zoną po gniuždymo bandymo, bandiniai nufotografuoti elektroniniu mikroskopu JEOL ISM 7600F (2.8 pav.). Iš pateiktų nuotraukų matyti, kad stiklo granulės (porėtos struktūros dalelės) pasiskirsto tolygiai, o matricos mišinio ir lengvojo užpildo sąlyčio zona (skirtingai nei matricos mišinio ir plastiko dalelių sąlyčio zona) yra tanki. Tai užtikina bendrą lengvojo užpildo ir matricos mišinio sąveiką.



2.7 pav. Mišinių su skirtingais lengvaisiais užpildais ir mikroužpildais priklausomybės nuo smėlio tūrio mišinyje pakeitimo lengvuju užpildu: a) gniuždomojo stiprio; b) tankio; c) mišinio su PS(0–1,0) užpildu ir MKS mikroužpildu gniuždomojo stiprio po 7 ir 28 parų kietėjimo palyginimas; d) mišinio su PS(0–1,0) užpildu ir MS mikroužpildu gniuždomojo stiprio po 7 ir 28 parų kietėjimo palyginimas

Fig. 2.7. Relationships of mixes with different lightweight aggregate and microfiller according to volumetric replacement of sand with lightweight aggregate: a) compressive strength; b) density; c) relationship comparison after 7 and 28 days of compressive strength for mixes with PS(0–1,0) aggregate and MKS microfiller; d) relationship comparison after 7 and 28 days of compressive strength for mixes with PS(0–1,0) aggregate and MS microfiller



2.8 pav. Elektroniniu mikroskopu gauti PS10 bandinio vaizdai: a) priartinta 50 kartų; b) priartinta 2000 kartų

Fig. 2.8. Microscopic views of specimen PS10: a) PS10 enlarged 50 times; b) enlarged 2000 times

2.3.3. Mišinių su pūsto stiklo ir keramzito užpildais mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai

Šių tyrimų tikslas – išlaikant vienodą matricos mišinio sudėtį mišinių gamybai įvairiomis proporcijomis kombinuotai panaudoti pūsto stiklo ir keramzito užpildus. Tyrimais siekta nustatyti skirtingų lengvojo užpildo proporcijų įtaką gniuždomajam stipriui, tankiui ir užpildo pasiskirstymui mišinyje. Šiuose tyrimuose naudotos tokios pat medžiagos kaip ir 2.3.2 skirsnyje aprašytuose bandymuose, išskyrus superplastiklį. Vietoj dviejų superplastiklių derinio naudotas vienas SP3, kurio kiekis sudarė 2 % nuo cemento masės. V/C santykis visuose mišiniuose išlaikytas 0,33.

Skirtingi lengvieji užpildai buvo derinami išlaikant tą patį bendrą lengvojo užpildo tūrį mišinyje, keičiant jų tarpusavio proporcijas. Tyrimuose naudotų lengvųjų užpildų dydis skiriasi apie 4,0 kartus ir mišiniuose PS(0,5–1) gali užpildyti tarpus tarp K(2–4) užpildų. Etaloniniuose mišiniuose naudotas tik keramzitas. Kituose mišiniuose 5, 10, 20, 25, 50, 75 ir 100 % keramzito pakeista stiklo granulėmis. Kaip mikroužpildas naudotas maltas kvarcinis smėlis (MKS). Mišinių sudėtys skaičiuotos betonui, kurio tankis 1700 kg/m^3 . Iš viso išbetonuoti 8 skirtingi savaime sutankėjantys mišiniai, kurių sudėtys pateiktos 2.5 lentelėje. Bandinio žymens skaitinė vertė (2.5 lentelė) nurodo tūrinį PS(0,5–1) kiekį procentais bendrame 100 % lengvojo užpildo tūryje. Likęs lengvasis užpildas yra K(2–4).

Gniuždomųjų stiprių ir tankių priklausomybės nuo PS(0,5–1) ir K(2–4) kiekio mišinyje pateiktos 2.9 a ir c paveiksle. Papildomai 2.9 b ir 2.9 d paveiksle pateikti skirtingų mišinių santykiniai gniuždomieji stipriai $f_{c,i}/f_{c,PSU0}$ ir tankiai ρ_i/ρ_{PSU0} , čia $f_{c,PSU0}$ atitinka betono mišinio tik su K(2–4) užpildu gniuždomąjį stiprį

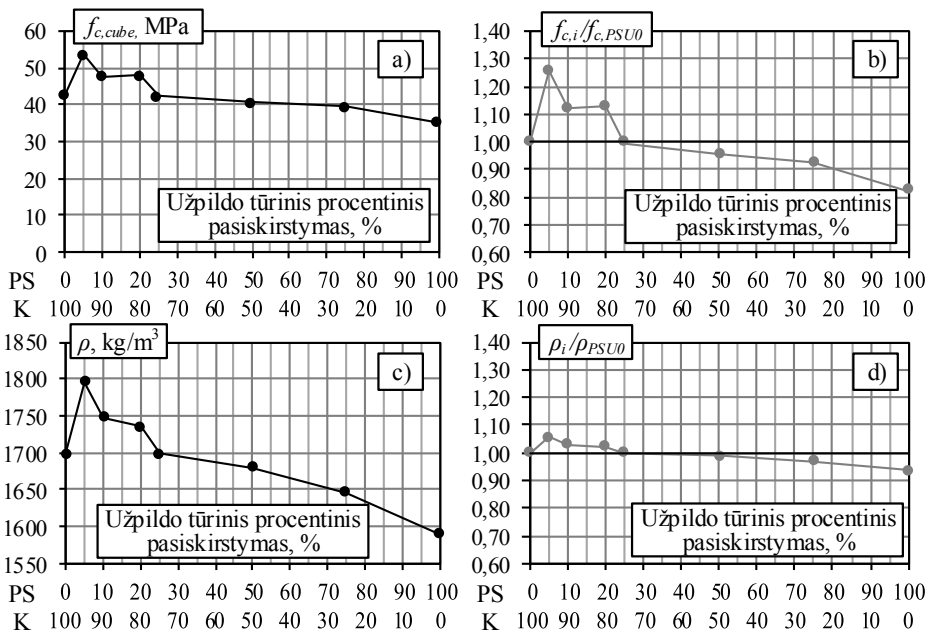
ir buvo imta kaip atskaitinė vertė, o, $f_{c,i}$ atitinka mišinių su tam tikru kiekiu (nuo 5 iki 100 %) PS(0,5–1) užpildo gniuždomąjį stiprį. Atitinkamai ρ_{PSU0} atitinka betono mišinio tik su K(2–4) užpildu tankį (atskaitinis tankis), o ρ_i – tankį mišinių su atitinkamu kiekiu PS(0,5–1) užpildo.

2.5 lentelė. Lengvojo betono su mišriu užpildu sudėtys

Table 2.5. Mix compositions of lightweight concrete with combined aggregates

Eil. Nr.	Žymuo	Kiekis, kg/m ³				RP, nuo CEM masės, %	$f_{c,cubes}$ MPa	ρ , kg/m ³
		CEM	MKS	Smėlis	K(2–4)+ PS(0,5–1)			
1	PSU0	608	152	525	360+0	0,03	42,7	1699
2	PSU5				342+10,8	0,02	53,6	1796
3	PSU10				324+21,6	0,02	47,7	1748
4	PSU20				288+43	0,02	48,0	1735
5	PSU25				270+54	0,03	42,4	1699
6	PSU50				180+108	—	40,7	1680
7	PSU75				90+162	0,02	39,3	1646
8	PSU100				0+216	0,02	35,1	1590

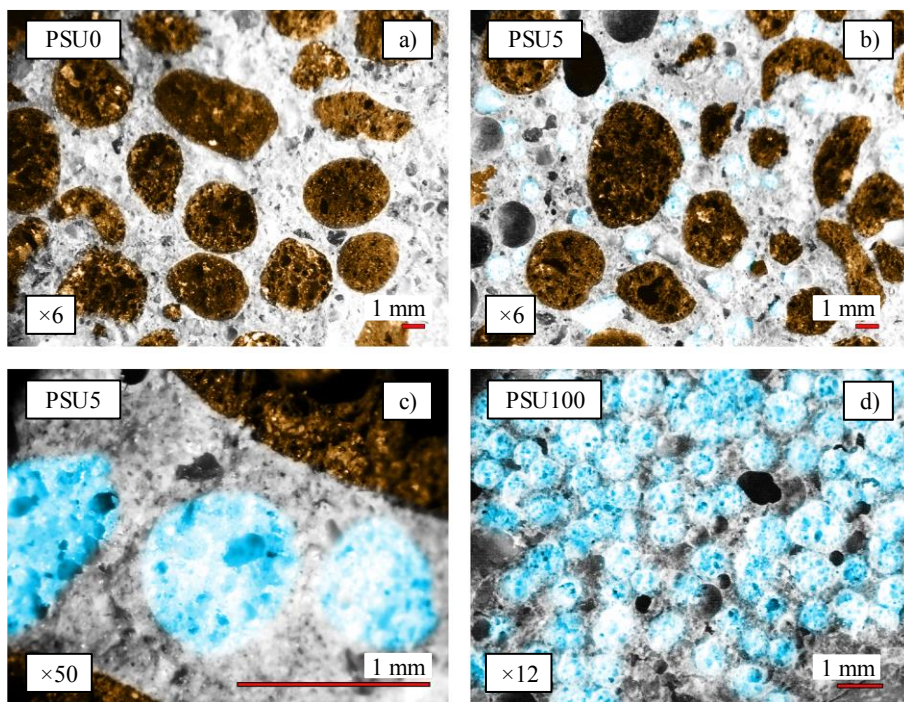
Iš pateiktų rezultatų matyti, kad 5 % K(2–4) užpildo tūrį pakeitus PS(0,5–1) (bandinys PSU5) užpildu, LB tankis padidėjo nuo 1700 kg/m³ iki 1796 kg/m³ (5,6 %), o gniuždomasis stipris – nuo 42,7 iki 53,6 MPa (25,5 %). Nežymų tankio padidėjimą galima paaiškinti tuo, kad nedidelis PS(0,5–1) kiekis sumažino mišinio klampumą ir galėjo paveikti vidinio drėkinimo procesą dėl tolygiau paskirstyto vandens matricoje. Kita vertus, mažesnės užpildo PS(0,5–1) dalelės galėjo užpildyti mišiniuose esančias poras, dėl to gautas didesnis tankumo mišinys. Tai galėjo įvykti ir dėl matricos tankio padidėjimo. Vis dėlto būtina pažymėti, kad palyginti nežymų tankio padidėjimą kompensuoja gerokai didesnis gniuždomasis stipris. Toliau didinant PS(0,5–1) kiekį mišinyje iki 25 %, etaloninio mišinio PSU0 ir mišinio PSU25 tankiai tampa vienodi, o gniuždomasis stipris skiriasi nedaug – atitinkamai 42,7 MPa ir 42,4 MPa. Tolimesnis PS(0,5–1) kiekio didinimas mišinyje lemia betono stiprio ir tankio mažėjimą. Didinant PS(0,5–1) kiekį mišinyje iki 50 %, gniuždomasis stipris sumažėja iki 40,7 MPa (4,7 %), o tankis – iki 1680 kg/m³ (1,2 %). Mišinyje su 100 % PS(0,5–1) gniuždomasis stipris sumažėja iki 35,1 MPa (17,8 %), tankis – 1590 kg/m³ (6,5 %). Kadangi bendras lengvojo užpildo tūris nesikeitė, tankis sumažėja dėl lengvojo užpildo svorio mažėjimo, sudėtyse didėjant mažesnio tankio PS(0,5–1) užpildo kiekiui. Kitiems mišiniams gautos tarpinės gniuždomojo stiprio ir tankio vertės.



2.9 pav. Lengvojo betono su mišriu lengvuju užpildu gniuždomasis stipris ir tankis po 28 parų kietėjimo: a) gniuždomojo stiprio priklausomybė nuo skirtingų lengvųjų užpildų santykio mišinyje; b) santykinės gniuždomojo stiprio vertės; c) ore kietėjusio betono tankio priklausomybė nuo užpildų santykio mišinyje; d) santykinės tankio vertės (čia PS atitinka PS(0–0,5), K atitinka K(2–4))

Fig. 2.9. The compressive strength and density of lightweight concrete with mixed lightweight aggregates after 28 days of hardening: a) the dependence of compressive strength on the lightweight aggregate ratio; b) normalized compressive strength; c) the dependence of air-dried density on the lightweight aggregate ratio; d) normalized density

Atlikti mišinių su skirtingais smulkiaisiais lengvaisiais užpildais ir jų deriniais su didelio stiprio cemento matrica atskleidė šias tendencijas: kai betonas taikomas konstrukcijoms, kurioms svarbus didesnis gniuždomojo betono stipris negu mažesnis tankis, jų mišinių gamybai galima taikyti PSU5, PSU10 ir PSU20 mišinius, kuriuose K(2–4) užpildai pakeičiama atitinkamai 5, 10 ir 20 % PS(0,5–1) užpildais. Šių mišinių gniuždomieji stipriai kinta 48–54 MPa, o santykiniai stipriai – nuo 1,12 iki 1,26. Kai gniuždomasis stipris nėra svarbus, o lemiamas veiksnys yra tankis (pvz., siekiant pagaminti lengvesnę konstrukciją), LB mišiniuose kaip lengvąjį užpildą galima naudoti PS(0,5–1). Tyrimuose gautas šio mišinio tankis yra 1590 kg/m^3 , o tai yra 7 % mažesnis už etaloninio PSU0 mišinio.



2.10 pav. Skeltų bandinių mikroskopinės nuotraukos (keramzitas paryškintas ruda spalva, o pūstas stiklas – mėlyna): a) PSU0; b) PSU5; c) PSU5; d) PSU100

Fig. 2.10. Microscopic views of specimens after splitting test (expanded clay highlighted in brown, expanded glass in blue): a) PSU0; b) PSU5; c) PSU5; d) PSU100

Naudojant skirtingų frakcijų lengvuosius užpildus gali skirtis jų išsidėstymas cementinėje matricoje. Šiam efektui įvertinti papildomai atlikta bandinių struktūrinė analizė skaitmeniniu mikroskopu „MOTIC K-400 L“ su vaizdo kamera „Pixera VSC“. Tyrimų metu bandiniai PSU0 (2.10 a pav., didinimas 6), PSU5 (2.10 b pav., didinimas $\times 6$ ir 2.10 c pav. didinimas $\times 50$) bei PSU100 (2.10 d pav. didinimas 12) buvo fotografuoti skaitmeniniu mikroskopu. Iš 2.10 a paveikslo matyti, kad tamsūs K(2–4) užpildai (paryškinti ruda spalva) yra apsupti matricos iš hidratuotų cemento naujadarų ir smėlio. Tačiau yra galimi sąlyčiai tarp K(2–4) dalelių paviršių. PS(0,5–1) buvimas matricoje (2.10 b ir c pav.) mažina K(2–4) paviršių tarpusavio sąlyčių skaičių ir mažesnės frakcijos PS(0,5–1) gali veikti betono mišinį keliais būdais: a) mažėjant trinčiai tarp stambesnių K(2–4) gerėja mišinio takumas; b) betono mišinio tūryje tolygiau pasiskirsto vanduo esant vidiniam drėkinimui. Toliau didėjant PS(0,5–1) kiekiui (2.10 d pav.) vientisos matricos nelieka ir užpildai sudaro besijungiančią porinę struktūrą. Tai gali lemti mišinio atsparumo šalčiui sumažėjimą.

2.3.4. Mišinių su keramzito užpildu mechaninių ir fizikinių savybių tyrimai

Šiuose tyrimuose siekta gauti savaime sutankėjančio konstrukcinio betono mišinio sudėtis, naudojant keramzito užpildą. Atliktais tyrimais patobulinta darbe (Rumšys 2014) pasiūlyta lengvojo betono sudėtis (cilindrinis gniuždomasis stipris $f_{cm,28} = 46,4$ MPa, $\rho = 1900$ kg/m³), modifikuojant mišinį į savaime sutankėjančią. Papildomai tyrinėta superplastiklio kiekio įtaka mišinio savybėms, o dalis cemento kiekio pakeista lakiaisiais pelenais (LP). Šiuose tyrimuose naudotas superplastiklis SP3 ir reologinis priedas (RP), kurio kiekis sudarė 0,02 % nuo cemento masės. Taip pat naudotas Rocket M600 CEM I 42,5 R (CEM 42,5R(R)) cementas.

2.6 lentelė. Lengvojo betono sudėtys su keramzito užpildu

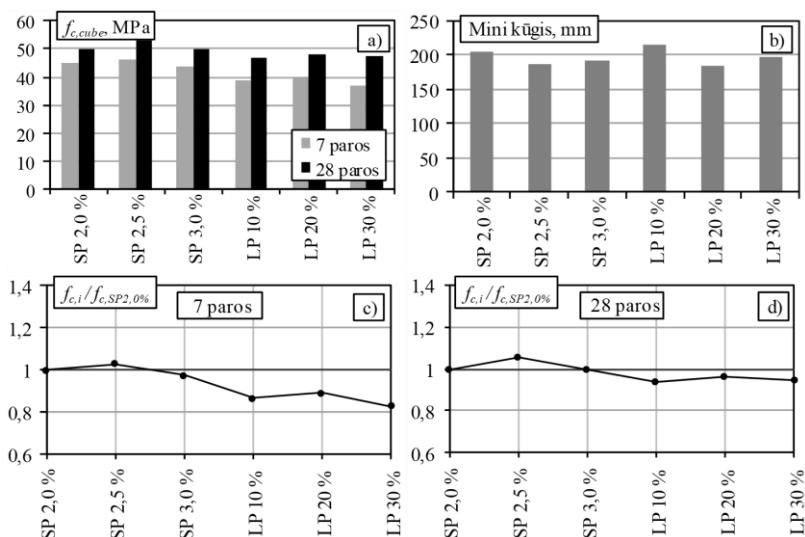
Table 2.6. Mix compositions of lightweight concrete with expanded clay aggregate

Eil. Nr.	Žymuo	Kiekis, kg/m ³					SP nuo CEM, %	V/(C+ 0,4LP)	$f_{c,cubes}$ MPa	ρ , kg/m ³
		CEM	MKS	Smėlis	LP	Užpildas				
1	K1920 SP2,0 %	608	113	900	–	297	2,0	0,32	50,0	1921
2	K1920 SP2,5 %						2,5	0,30	52,8	1912
3	K1920 SP3,0 %						3,0	0,30	49,8	1915
4	K1920 LP10 %	547			61		2,0	0,35	46,9	1911
5	K1920 LP20 %	486			122			0,36	48,3	1915
6	K1920 LP30 %	426			182			0,37	47,3	1907

Mišinio sklidumui nustatyti atliktas mini kūgio bandymas. Pasirinkta siekiamoji mini kūgio vertė – 180–220 mm. Taip pat vizualiai stebėta, ar mišinys neišsisluoksniuoja. Iš viso suformuoti šeši mišiniai, kurių sudėtys pateiktos 2.6 lentelėje. Atsižvelgiant į tyrimų tikslus, bandiniai suskirstyti į dvi grupes po tris mišinius. Pirmojoje grupėje K1920 bandiniais su priedu SP siekta ištirti superplastiklio kiekio įtaką LB gniuždomajam stipriui. Žymėjimo pabaigoje esantis skaičius atitinka mišiniui panaudotą superplastiklio procentinį kiekį nuo cemento masės (pvz., mišinyje K1920 SP2 % panaudota 2 % superplastiklio nuo cemento masės). Kitoje grupėje K1920 bandiniai turi priedą LP, nurodantį lakiuosius pelenus. Šiais tyrimais siekta išsiaiškinti, kokią įtaką betono mišinių gniuždomajam stipriui turi dalinis cemento pakeitimas lakiaisiais pelenais. Šalia LP raidžių

esantis skaičius atitinka cemento pakeitimo lakiaisiais pelenais procentinę dalį (pvz., žymėjimas K1920 LP10 % reiškia, kad 10 % cemento buvo pakeista lakiaisiais pelenais). Kadangi visi mišiniai turi tą patį žymėjimą K1920, toliau paveiksluose jis nerašomas.

Gniuždomojo stiprio po 7 ir 28 parų bandymų rezultatai pateikti 2.11 a paveiksle. Papildomai, 2.11 c ir d paveiksle pateiktos santykinės gniuždomojo stiprio $f_{c,i}/f_{c,SP2,0}$ % vertės atitinkamai po 7 ir 28 kietėjimo parų. Apskaičiuojant šias vertes, tariama, kad atskaitos mišinys yra K1920 SP2 %, o $f_{c,i}$ atitinka nagrinėjamos sudėties mišinio gniuždomąjį stiprį. Visų mišinių tankis gautas apytikriai vienodas (skirtumas tarp didžiausios ir mažiausios reikšmės sudarė 0,7 %), todėl tankių grafikas papildomai nepateikiamas. Mišinių mini kūgio rezultatai pateikti 2.11 b paveiksle.



2.11 pav. K1920 mišinių su skirtingu superplastiklio kiekiu ir lakiaisiais pelenais, iš dalies pakeitusiais cementą, savybės: a) gniuždomojo stiprio vertės po 7 ir 28 parų; b) mini kūgio rezultatai; c) santykinės gniuždomojo stiprio reikšmės po 7 parų kietėjimo; d) santykinės gniuždomojo stiprio reikšmės po 28 parų kietėjimo

Fig. 2.11. Properties of K1920 mix with different amount of superplasticizer and partly replaced cement with fly ash: a) compressive strength values after 7 and 28 days, b) mini cone results, c) relative compressive strength after 7 days of hardening; d) relative compressive strength after 28 days of hardening

Nagrinėjant superplastiklio kiekio įtaką, 2.11 c paveiksle galima pastebėti, kad SP2,0 %, SP2,5 %, SP3,0 % mišinių gniuždomasis stipris yra labai artimas: SP2,5 % ir SP3,0 % gniuždomieji stipriai, lyginant su etaloniniu SP2,0 % mišiniu, skiriasi atitinkamai, 2,6 % ir –2,5 %. Galima teigti, kad superplastiklio kiekis

neturi reikšmingos įtakos betono gniuždomajam stipriui po 7 parų kietėjimo. Rezultatai šiek tiek pasikeičia po 28 parų (2.11 d pav.). Mišinys SP2,5 %, lyginant su etaloniniu SP2,0 %, turi 5,5 % didesnę gniuždomąją stiprį, o SP3,0 % išlieka praktiškai toks pat, kaip ir SP2,0 % (skirtumas –0,3 %). Darytina išvada, kad gniuždomojo stiprio požiūriu lengvojo betono mišiniais su keramzito užpildu tikslinga naudoti 2,5 % superplastiklio kiekį nuo cemento masės.

Nagrinėjant cemento pakeitimo įtaką lakiaisiais pelenais (2.11 c pav.) nustatyta, kad po 7 parų kietėjimo visų mišinių gniuždomasis stipris yra mažesnis už etaloninio SP2,0 % mišinio. LP10 %, LP20 %, LP30 % mišiniais gautas atitinkamai toks skirtumas: 13,6 %, 11,0 % ir 17,3 %. Analizuojant 28 parų gniuždomojo stiprio rezultatus (2.11 d pav.) gauta, kad gniuždomojo stiprio vertės priartėja prie etaloninio mišinio stiprių: LP10 %, LP20 %, LP30 % mišiniais gauti atitinkamai 6,1 %, 3,4 %, 5,4 % mažesni gniuždomieji stipriai. Apibendrinant galima teigti, kad dalį cemento pakeičiant lakiaisiais pelenais, mišinio gniuždomojo stiprio augimas yra lėtesnis, tačiau po 28 parų kietėjimo stiprio sumažėjimas yra ne toks reikšmingas. Įvertinus šiuos pokyčius lengvojo betono mišinių gamybai galima sutaupyti iki 30 % cemento.

2.3.5. Pasirinktų mišinių reologinių savybių tyrimas

Atlikus mišinių parinkimo eksperimentinę dalį, nuspręsta atrinkti konstrukcinių elementų gamybai tinkamus mišinius ir ištirti jų reologines bei ilgaamžiškumo savybes. Tyrimams pasirinkti šie mišiniai:

- K1920 su keramzito užpildu. Mišinio tankis – 1921 kg/m³, gniuždomasis stipris – 50 MPa;
- PSU20 derinant keramzito ir pūsto stiklo užpildus. Mišinio tankis – 1735 kg/m³, gniuždomasis stipris – 48 MPa;
- PS9 su pūsto stiklo užpildu. Mišinio tankis – 1569 kg/m³, gniuždomasis stipris – 52,3 MPa.

Mišinių gamybai naudotas Rocket M600 CEM I 42,5 R klasės cementas (žymimas CEM 42,5 R(R)) ir SP3 superplastiklis. Naudotų mišinių sudėtys pateiktos 2.7 lentelėje. Mišinio gamyba detaliau aprašyta 2.2.3 skirsnyje.

2.7 lentelė. Naudotų mišinio sudėtys

Table 2.7. Proportions of used mixtures

Eil. Nr.	Žymuo	Kiekis, kg/m ³						% nuo CEM		V/C
		CEM	Smėlis	K(2–4)	PS(0,5–1)	MKS	MS	SP3	RP	
1	K1920	608	900	297	–	113	–	2,0	0,02	0,33
2	PSU20	630	525	288	43	152	–	2,0	0,02	0,32
3	PS9	870	–	–	280	102	46	1,0	0,03	0,29

Visiems mišiniams nustatytos savaime sutankėjančio lengvojo betono reologinės savybės atliekant J žiedo, L dėžės ir V piltuvo bandymus pagal 2.2.4 skirsnyje aprašyta metodiką. Gauti bandymų rezultatai pateikti 2.8 lentelėje. Taip pat šioje lentelėje pateiktos ir rekomendacinės EFNARC (2002) vertės, skirtos įprasto svorio betonui. Savaime sutankėjančio įprasto svorio betono 2.8 lentelėje pateiktus rekomenduojamus dydžius galima naudoti ir lengvajam savaime sutankėjančiam betonui. Tačiau betono su lengvaisiais užpildais bandymo vertės gali skirtis lyginant su normalaus svorio betonu. Toutanji *et al.* (2015), savo tyrimuose išbandę 54 lengvojo ir 8 normalaus savaime sutankėjančio betono sudėtis, pastebėjo, jog srauto tekėjimo laikas (V piltuvo) priklauso nuo betono tankio ir LB jis yra ilgesnis. Taip pat ir L dėžės bandymuose betono tekėjimo laikas gali pailgėti iki 25 % ir daugiau (Bogas *et al.* 2012). Šias tendencijas lemia tai, kad betonas su lengvaisiais užpildais turi mažesnę energiją (dėl mažesnės veikiančios sunkio jėgos), reikalingą savaiminiam ištekėjimui, lyginant su įprasto svorio betonu. Tai prailgina ištekėjimo laiką, tačiau nepablogina betono takųjų savybių. Kadangi rekomendacijų dėl lengvojo savaime sutankėjančio betono reologinių savybių nėra, tyrimuose su tam tikromis korekcijomis taikytos tradicinio savaime sutankėjančio betono savybės apibūdinantys dydžiai. Apibendrinus gautus rezultatus, galima teigti, kad visi lentelėje pateikti bandiniai turi tinkamas savaime sutankėjančio šviežio betono savybes.

2.8 lentelė. Reologinių mišinių savybių bandymo rezultatai

Table 2.8. Test results of rheological properties of mixes

Mišinys	J žiedo		L dėžės	V piltuvo
	t_{500J}, s	PJ, mm	PL	t_v, s
K1920	12,6	6	0,89	22,7
PSU20	12,4	3	0,95	32,1
PS9	8,66	12	0,75	11,5
Rekomenduojama NB	2–5	0–10	0,8–1,0	6–12

2.9 lentelė. Mišinių savybės

Table 2.9. Properties of mixes

Eil. Nr.	Mišinys	$f_{c,cube}, MPa$	$\rho_{ore\ kietėjes}, kg/m^3$	$\rho_{išdiovintas}, kg/m^3$
1	K1920	51,6	1947	1925
2	PSU20	44,3	1802	1779
3	PS9	39,6	1360	1332

Po reologinių savybių tyrimų buvo suformuoti betono mišiniai kontroliniams mechaninių ir fizikinių savybių tyrimams. Gniuždomojo stiprio, ore kietėjusio bandinio tankio ir išdžiovinto bandinio tankio po 28 parų bandymų rezultatai pateikti 2.9 lentelėje.

2.3.6. Pasirinktų mišinių ilgaamžiškumo savybių tyrimas

Šiame skirsnyje atlikti pasirinktų mišinių ilgaamžiškumo savybių tyrimai. Šiame etape išbetonuoti papildomi bandiniai (iš viso 72). Tyrimų metodika aptarta 2.2.2 skirsnyje. Eksperimentų metu atliktas vandens įgeriamumo markės ir šalčio atsparumo nustatymas, taip pat susitraukimo deformacijų matavimas. Siekiant nustatyti galimą pūsto stiklo užpildo poveikį betono šarminei korozijai, atlikti mišinių S1 ir PS9 (2.4 lentelė) šarminės korozijos tyrimai.

Atlikti K1920, PSU20 ir PS9 mišinių vandens įgeriamumo ir vandens įgeriamumo markės nustatymo bandymai. Gauti rezultatai apibendrinti 2.10 lentelėje. Gautas vandens įgeriamumas svyravo nuo 3,05 iki 4,17 %. K1920 ir PSU20 bandinių vandens įgeriamumo klasė atitiko W4, o bandinių PS9 – žemesnę W2 klasę. Žemesnę PS9 klasę galbūt lėmė didelės betono susitraukimo deformacijos (aprašytos toliau šiame skirsnyje), dėl kurių bandiniuose galėjo susiformuoti mikroplyšiai bei kapiliarų tinklas.

Atsparumo šalčiui bandymai atlikti 150 ir 200 ciklų skaičiui. Pagal gautus rezultatus bandiniai su keramzito užpildu (K1920) ir mišriu keramzito bei pūsto stiklo užpildu (PSU20) atitinka F200 atsparumo klasę. PS9 mišinys neatlaikė 150 šaldymo ciklų (po 150 ir 200 ciklų skaičiaus gniuždomasis stipris sumažėjo atitinkamai 8,59 ir 10,86 %). Atsparumo šalčiui rezultatai pateikti 2.11 lentelėje.

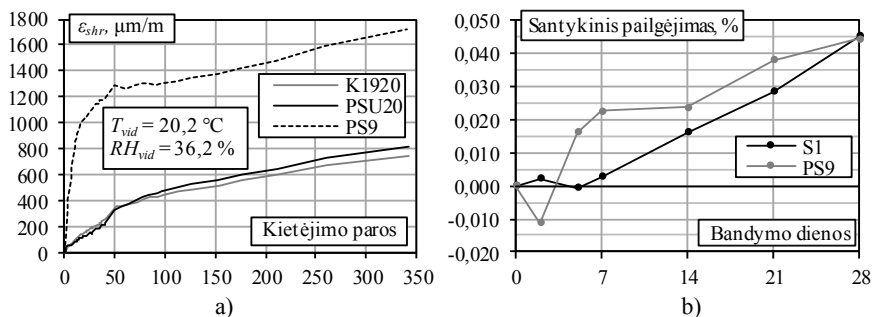
2.12 a paveiksle sugretinti trijų skirtingų bandinių serijų susitraukimo deformacijų kitimo laikui einant grafikai. Akivaizdu, kad lengviausio mišinio PS9 (ore kietėjęs tankis 1360 kg/m^3) susitraukimo deformacijos gerokai didesnės lyginant su K1920 ir PSU20 mišiniais (ore kietėję tankiai atitinkamai 1947 kg/m^3 ir 1802 kg/m^3). Mišiniui PS9 jau ankstyvoje stadijoje pasireiškė didelės susitraukimo deformacijos: po 7 parų kietėjimo šios deformacijos sudarė $650 \text{ }\mu\text{m/m}$, arba daugiau nei 10 kartų didesnės nei mišinių K1920 ir PSU20, kurių deformacijos atitinkamai buvo 60 ir $50 \text{ }\mu\text{m/m}$. Po 28 kietėjimo parų mišinių K1920, PSU20 ir PS9 gaunamos susitraukimo deformacijų vertės yra atitinkamai $190 \text{ }\mu\text{m/m}$, $145 \text{ }\mu\text{m/m}$ ir $1100 \text{ }\mu\text{m/m}$. Iš 2.12 a paveikslo matome, kad 50-ą kietėjimo parą visų mišinių susitraukimo deformacijų augimo intensyvumas ima mažėti. Po 100 kietėjimo parų mišinių K1920, PSU20 ir PS9 susitraukimo deformacijų vertės gaunamos atitinkamai $450 \text{ }\mu\text{m/m}$, $480 \text{ }\mu\text{m/m}$ ir $1305 \text{ }\mu\text{m/m}$, o po 340 kietėjimo parų – atitinkamai $745 \text{ }\mu\text{m/m}$, $815 \text{ }\mu\text{m/m}$ ir 1720 vertės. Didelės susitraukimo vertės PS9 mišiniui galbūt turėjo įtakos blogesniems šalčio atsparumo ir vandens markės nustatymo rezultatams, lyginant su K1920 ir PSU20 mišiniais.

2.10 lentelė. Bandinių vandens įgeriamumas ir markė**Table 2.10.** Water absorption and mark of specimens

Eil. Nr.	Mišinys	Vandens įgeriamumas, %	Vandens įgeriamumo markė
1	K1920	3,05	W4
2	PSU20	4,17	W4
3	PS9	3,38	W2

2.11 lentelė. Atsparumo šalčiui rezultatai**Table 2.11.** Test results of freeze-thaw

Eil. Nr.	Mišinys	Vidutinis gniuždymo stipris po tam tikro ciklų skaičiaus, MPa			Stiprio pokytis, %	
		0	150	200	150	200
1	K1920	51,6	51,2	49,2	-0,78	-4,65
2	PSU20	44,3	43,4	42,8	-2,07	-3,39
3	PS9	39,6	36,2	35,3	-8,59	-10,86

**2.12 pav.** Pasirinktų mišinių ilgalaikės savybės: a) susitraukimo deformacijų kitimas laike; b) šarminės korozijos bandymų rezultatai**Fig. 2.12.** Long-term properties of selected mixtures: a) shrinkage strain versus time; b) results of alkaline corrosion

Šarminės korozijos tyrimai

Remiantis 2.2.2 skirsnyje pateikta metodika atlikti S1 ir PS9 mišinių (2.4 lentelė) šarminės korozijos tyrimai. S1 pasirinktas kaip etaloninis bandinys, o PS9 – kaip mišinys, kuriame šarminės korozijos pasireiškimas yra labiausiai tikėtinas. Kitiems tyrimuose nagrinėtiems mišiniams šarminės korozijos pasireiškimas yra ne toks reikšmingas.

Tyrimų metu eksperimentiškai nustatyti prizmių ilgio pokyčiai pateikti 2.12 b paveiksle. Iš grafiko matyti, kad pradiniam etape vykstančius abiejų

bandinių susitraukimo procesus galima priskirti cemento hidratacijos procesui (Wu *et al.* 2017). Toliau vyksta procesai, susieti su šarmine korozija. Dėl mažesnio tankio šie procesai anksčiau pasireiškia bandinyje PS9 su PS(0,5–1) lengvuju užpildu. Po 28 parų bandinių S1 ir PS9 santykinis pailgėjimas tampa praktiškai vienodas.

Prizmių ilgio pokyčio rezultatai rodo, kad ir po 28 parų trukmės bandymų eksperimentiškai gauta ribinė pailgėjimo vertė abiem mišiniams yra apytikriai 0,045 % ir neviršija Nixon ir Sims (2016) rekomenduojamos 0,075 % vertės (įvertinus formos įtaką). Interpretuojant rezultatus, galima teigti, kad naudojant cementą su $\text{Na}_2\text{O}_{\text{ekv}} = 0,804$ % LB bandiniai su smulkiuoju PS(0,5–1) užpildu šarminės korozijos proceso veikiami tuo pačiu laipsniu kaip ir tankaus betono bandiniai su smėlio užpildu, o skirtingų mišinių bandinių pailgėjimo ribinės vertės po 28 dienų bandymo yra tokios pat. Atlikti tyrimai patvirtina, kad PS(0,5–1) lengvuosiuose mišiniuose gali būti taikomi be apribojimų, susijusių su šarmine korozija. Kitiems šiame darbe tyrinėtiems LB mišiniams su PS(0,5–1) užpildu dėl mažesnio jo kiekio mišiniuose galioja tos pačios tendencijos.

2.4. Antrojo skyriaus išvados

Apibendrinus antrajame skyriuje pateiktus rezultatus galima teigti, kad:

1. Nustatyti mišinių su plastiko užpildais po 28 dienų kietėjimo gniuždomieji stipriai svyravo nuo 40 MPa iki 49,2 MPa, o tankis – nuo 1954 kg/m³ iki 2044 kg/m³. Atskaitinių mišinių su vienoda matricos sudėtimi ir keramzito užpildu gniuždomieji stipriai gauti vidutiniškai 35 % didesni (66,1–70,2 MPa), o tankiai panašūs (1932–1975 kg/m³). Atlikus vandens įgeriamumo bandymus nustatyta, kad bandinių su plastiko užpildu (plastiko užpildas praktiškai neįgeria vandens), vandens įgeriamumas siekė 2,14–3,77 %, o bandinių su keramzito užpildu – 1,48–1,76 %, t. y. 1,4–2,1 karto mažiau. Ši tendencija paaiškinama tuo, kad sąlyčio zonoje tarp plastiko užpildo ir cementinio mišinio nėra adhezijos (priešingai nei sąlyčio zonoje tarp keramzito ir cementinio mišinio), dėl to šioje zonoje susiformuoja mikroplyšiai. Šie plyšiai bandinyje sudaro kapiliarų sistemą, kuria gali judėti drėgmė.
2. Tyrimais nustatyta, kad esant tam pačiam cemento kiekiui, V/C santykiui ir mikroužpildui, t. y. tai pačiai matricos mišinio sudėčiai, taip pat tam pačiam bendram smėlio ir lengvojo užpildo tūriui, gaunamos panašios mišinių su skirtingais lengvaisiais užpildais gniuždomojo stiprio ir tankio priklausomybės. Lengvojo konstrukcinio betono

mišiniams su pūsto stiklo užpildu stiprumo aspektu efektyvesnis mikroužpildas yra maltas kvarcinis smėlis. Naudojant maltą kvarcinį smėlį kartu su pūsto stiklo granulėmis, gautas mišinys, kurio gniuždomasis stipris yra 52,9 MPa, o tankis – 1569 kg/m³. Siekiant gauti mažesnę tūrinį svorį, rekomenduotina taikyti silicio dioksido mikrodulkių mikroužpildą. Tyrimuose parinkto mišinio gniuždomasis stipris yra 39,5 MPa, tankis – 1458 kg/m³.

3. Išlaikant tą patį lengvojo užpildo tūrį mišinyje, tačiau skirtingomis proporcijomis derinant mažos frakcijos pūsto stiklo ir keramzito užpildus, gaunami panašaus tankio betono mišiniai (tankių skirtumas siekia iki 6 %), tačiau skirtingas gniuždomasis stipris (skirtumas sudaro iki 26 %). Nustatyta, kad geriausi gniuždomojo stiprio rezultatai gaunami keramzitą nuo 5 % iki 20 % pakeičiant tokio pat tūrio pūsto stiklo užpildu.
4. Gniuždomojo stiprio požiūriu savaime sutankėjančio lengvojo betono mišiniams su keramzito užpildu tikslinga naudoti 2,5 % superplastiklio nuo cemento masės. Mišiniuose dalį cemento pakeitus lakiaisiais pelenais, nustatyta, kad po 7 parų kietėjimo visų mišinių gniuždomasis stipris yra mažesnis už etaloninio mišinio be lakiųjų pelenų. Gautas skirtumas sudaro 11,0–17,3 %. Po 28 parų kietėjimo mišinių su lakiaisiais pelenais gniuždomojo stiprio sumažėjimas yra mažiau reikšmingas ir sudaro nuo 3,4 % iki 6,1 %. Įvertinus šiuos pokyčius, lengvojo betono mišinių gamybai galima sutaupyti iki 30 % cemento.
5. Vandens įgeriamumo ir vandens įgeriamumo markės nustatymo bandymai parodė, kad mišiniai su keramzito užpildu bei derinant keramzito ir pūsto stiklo užpildus atitinka W4 markę, o mišiniai su pūsto stiklo užpildu – W2 markę. Visų mišinių vandens įgeriamumas svyravo nuo 3,05 iki 4,17 %.
6. Atsparumo šalčiui bandymo rezultatai atskleidė, kad bandiniai su keramzito užpildu ir mišriu keramzito bei pūsto stiklo užpildu atlaiko 200 šaldymo ciklą ir atitinka F200 atsparumo klasės reikalavimus. Mišinys tik su pūsto stiklo užpildu neatlaikė 150 šaldymo ciklą. Šis mišinys praktiniu požiūriu gali būti naudojamas konstrukcijoms, kurioms atsparumo šalčiui reikalavimai nėra reikšmingi.
7. Atlikus tradicinio betono ir lengvojo betono su pūsto stiklo užpildu mišinių šarminės korozijos eksperimentinius tyrimus, nustatyta, kad po 28 parų trukmės bandymų gautos prizmių ribinės pailgėjimo vertės abiem mišiniams yra ~0,045 % ir neviršija rekomenduojamos 0,075 % ribinės vertės. Atlikti tyrimai patvirtina, kad pūsto stiklo užpildas

lengvuosiuose mišiniuose gali būti taikomas be apribojimų, susijusių su šarmine korozija.

8. Atsižvelgiant į bandymų rezultatus, tolimesniems armuoto lengvojo betono tyrimams pasirinkti skirtingo tankio mišiniai su keramzito (K1920) ir pūsto stiklo (PS9) užpildais.

Armuotų lengvojo betono sijų eksperimentiniai tyrimai

Skyriuje konstrukcinio lengvojo betono mišiniai panaudoti eksperimentinėms armuoto lengvojo betono sijoms gaminti. VGTU Statybinių konstrukcijų bandymų laboratorijoje pagaminti ir trumpalaikė statinė dviejų koncentruotų jėgų apkrova išbandyti 22 lenkiamieji elementai, kurių nominalieji armavimo procentai kito nuo 0,32 %, iki 0,90 %. Visos sijos buvo vienodų nominaliųjų matmenų: ilgis – 1500 mm, aukštis – 200 mm, plotis – 100 mm. Bandymų metu keturiuose skirtinguose grynojo lenkimo zonos lygiuose matuotos vidutinės elemento deformacijos, o jėgos pridėjimo vietose ir viduriniame pjūvyje – sijų poslinkiai (iš viso 14 matavimo taškų). Bandymo metu grynojo lenkimo zonos deformacijos bei pleišėjimas papildomai stebėtas sparčiąja vaizdo kamera. Gautos momentų ir kreivių diagramos palygintos su teoriškai apskaičiuotomis taikant STR 2.05.05 (2005), LST EN 1992-1-1 (2005) ir ACI 318 (2018) projektavimo normų metodikas. Eksperimentinės lenkimo momentų ir kreivių diagramos vėliau bus panaudotos tempiamosios zonos betono fizikiniam modeliui išvesti, o šis pritaikytas armuoto LB sijų skaitinei deformacijų analizei. Skyriaus tematika paskelbtos keturios mokslinės publikacijos (Kaklauskas *et al.* 2018; Rumšys *et al.* 2014, 2015; Rumšys 2014).

3.1. Naudotų medžiagų savybės

Betonas

Tolimesniems armuoto lengvojo betono lenkiamųjų elementų tyrimams pasirinkti skirtingo tankio mišiniai su keramzito (K1920) ir pūsto stiklo (PS9) užpildais (žr. 2 skyrių). Tyrimams papildomai naudoti darbe (Rumšys 2014) pateiktų eksperimentinių sijų duomenys. Siekiant palyginti tradicinio ir lengvojo betono elementų elgsenos ypatumus, papildomai užbetonuotos panašaus projekcinio gniuždomojo stiprio tradicinio betono sijos (NB). Eksperimentiniuose tyrimuose naudotų mišinių sudėtyms pateiktos 3.1 lentelėje.

Betono mišinių paruošimo technologija aprašyta 2.2.3 skirsnyje. Paruošti mišiniai, papildomai netankinti (išskyrus DR-K10 mišinys, kuris tankintas rankiniu būdu ir NB mišinys, kuris tankintas vibruojant), klojami į metalinius klojinius.

Mišinio mechaninėms savybėms nustatyti buvo išbetonuoti ir išbandyti etaloninių matmenų kubai (150 150 150) ir cilindrai (Ø150 300). Gniuždomasis stipris nustatytas naudojant kubus ir cilindrų, o tamprumo modulis – cilindrų. Susitraukimo deformacijoms matuoti išbetonuotos 100 100 400 mm prizmės. Gauti rezultatai pateikiami 3.2 lentelėje (pateikta susitraukimo deformacijų vertė išmatuota bandymo dieną).

3.1 lentelė. Sijų gamybai naudotų mišinių sudėtys

Table 3.1. Compositions of mixtures used for casting of reinforced concrete beams

Medžiaga	Kiekis				
	K1920 ¹	K1920 ²	PS9	NB	DR-K10
Smėlis(0–4), kg/m ³	900		–	1165	967
K(2-4), kg/m ³	297		–	–	248
GS(2–5)*, kg/m ³	–		–	715	–
PS(0,5–1), kg/m ³	–		270	–	–
CEM 42,5R(R), kg/m ³	608		–	425**	578**
CEM 52,5R(A), kg/m ³	–		803	–	–
MS, kg/m ³	–		42	–	25
MKS, kg/m ³	113		95	–	83
SP1, % nuo CEM	–		–	0,5	0,5
SP2, % nuo CEM	–		–	3,0	3,0
SP3, % nuo CEM	2,0		1,5	–	–
RP, % nuo CEM	0,025		0,0375	–	–
V/C	0,33	0,30	0,26	0,35	0,26

*GS(2–5) – granitinė skalda, 2–5 mm frakcijos iš UAB „Granitinė skalda“

**Naudotas AB „Akmenės cementas“ CEM I 42,5 R klasės cementas

3.2 lentelė. Lengvojo betono charakteristikos**Table 3.2.** Properties of lightweight concrete

Eil. Nr.	Mišinys	7/28/B paros (B – bandymo diena)				Bandymo diena	ε_{shrs} $\times 10^{-6}$
		f_{cm} , MPa	f_{lcubes} , MPa	E_{cm} , GPa	ρ , kg/m ³		
1	K1920 ¹	33,6/36,8/36,8	38,8/42,1/42,1	22,4/20,1/20,1	1945/1927/1898	28–29	–58
2	K1920 ²	41,2/44,7/48,5	40,8/42,2/51,7	–/24,4/28,3	1984/1959/1949	141	–468
3	PS9 ¹	29,0/–/29,0	35,2/–/35,2	11,4/–/11,4	1379/–/1379	7	–1050
4	PS9 ²	34,4/–/34,4	32,5/–/32,5	11,5/–/11,5	1381/–/1381	7	
5	PS9 ³	29,4/–/29,4	35,0/–/35,0	11,7/–/11,7	1405/–/1405	7	
6	PS9 ⁴	–/–/–	35,3/–/35,3	–/–/–	1399/–/1399	7	
7	NB	35,4/39,2/41,6	46,3/58,4/61,9	–/–/–	2370/2363/2318	556–557	–611
8	DR-K10	39,6/46,4/49,2	42,3/56,1/54,7	26,2/25,5/24,4	1902/1897/1894	41–42	–199

3.3 lentelė. Armatūros charakteristikos**Table 3.3.** Properties of reinforcement bars

Eil. Nr.	Ø, mm	f_y , MPa	E_s , GPa	Eil. Nr.	Ø, mm	f_y , MPa	E_s , GPa
1	6	544	205	3	10	542	207
2	8	576	211	4	12	533	212

Armatūra

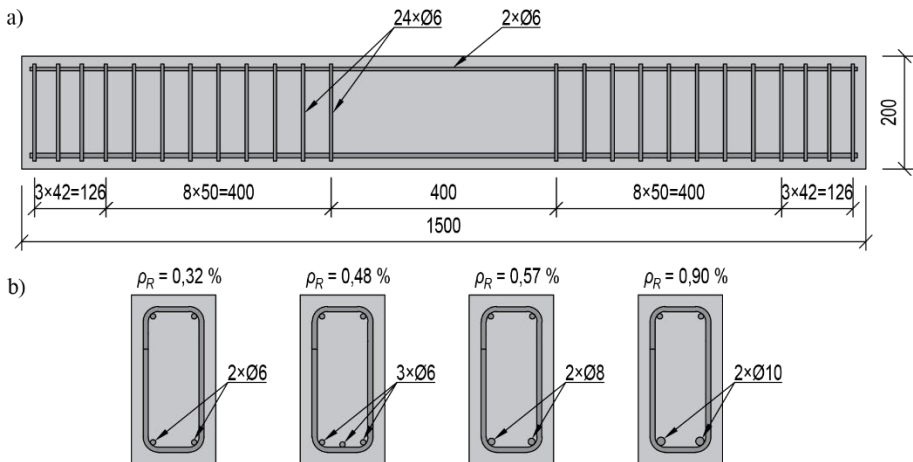
Bandymams naudota S500 klasės armatūra, kurios savybės nustatytos eksperimentais centriškai tempiant armatūros strypus hidrauliniu presu. Gauti rezultatai pateikiami 3.3 lentelėje.

3.2. Eksperimentiniai elementai

Eksperimentinių sijų nominalieji matmenys – 100×200×1500 mm (plotis aukštis ilgis), skaičiuojamasis ilgis – 1200 mm. Visos sijos armuotos S500 klasės strypais. Sijos atsparumui įstrižajame pjūvyje užtikrinti armuotos skersine Ø6 armatūra. Sijų principinė armavimo schema pateikta 3.1 a paveiksle. Apsauginis betono sluoksnis išilginių strypų atžvilgiu sudarė 20 mm. Iš viso suformuoti 22 lenkiamieji elementai. Sijos suskirstytos į 5 grupes pagal naudotą mišinį, o šios grupės – į pogrupius pagal armavimo procentą (3.1 b paveiksle pateikiami elementų skerspjūviai priklausomai nuo armavimo procento). Šias grupes sudarė:

1. Sijos, pagamintos naudojant DR-K10 mišinį (Rumšys 2014). Šioje grupėje yra trys pogrupiai po dvi sijas, kurių projektiniai armavimo procentai 0,32 %, 0,57 % ir 0,90 %.

2. Sijos pagamintos naudojant K1920¹ mišinį. Šioje grupėje buvo du pogrupiai. Pirmąjį pogrupį sudaro trys 0,32 % armavimo procento sijos, o antrąjį – dvi su 0,48 % armavimo procentu.
3. Sijos pagamintos naudojant K1920² mišinį. Šioje grupėje yra keturi pogrupiai po vieną siją, kurių projektiniai armavimo procentai – 0,32 %, 0,48 %, 0,57 % ir 0,90 %.
4. Sijos pagamintos naudojant PS9 mišinį. Šioje grupėje du pogrupiai po dvi sijas, kurių projektiniai armavimo procentai – 0,32 % ir 0,57 %.
5. Sijos pagamintos naudojant normaliojo betono mišinį. Šioje grupėje yra trys pogrupiai po vieną siją, kurių projektiniai armavimo procentai yra 0,32 %, 0,57 % ir 0,90 %.



3.1 pav. Eksperimentinių sijų geometriniai ir armavimo parametrai: a) armavimo schema; b) skerspjūviai (matmenys milimetrais)

Fig. 3.1. Geometric and reinforcing parameters of experimental beams: a) reinforcement scheme; b) cross-sections (dimensions in millimetres)

Eksperimentiniuose tyrimuose ypatingas dėmesys skirtas silpnai armuotų lengvojo betono elementų įtempių ir deformacijų būvio analizei. Visų pirma, gauti rezultatai papildo ištis negausią tokių elementų pasaulinę duomenų bazę. Kita vertus, tokiuose elementuose ypač išryškėja betono ir armatūros sąveikos tempimojoje zonoje aspektai. Kitas svarbus veiksnys – susitraukimo deformacijų vertinimas stadijoje iki apkrovimo. Kaip pavyzdį galima paminėti 2-os ir 3-ios grupės sijas, kurioms naudotas tas pats betono mišinys, tačiau sijos apkrautos skirtingu laiku po užbetonavimo: 3-ios grupės sijų kietėjimo laikas buvo apie penkis kartus ilgesnis lyginant su 2-os grupės elementais. Tokiu būdu 3-ios grupės sijoms

susitraukimo deformacijų įtaka tampa reikšmingesnė. Pagrindiniai eksperimentinių sijų duomenys pateikiami 3.4 lentelėje. Čia sijos žymėjimo pirmoji raidė „S“ atitinka „siją“, antroji raidė nurodo betono tipą (L – lengvasis, N – normalusis (įprasto svorio)), skaičius po raidės – bandinių grupę, antras skaičius nurodo tempiamosios išilginės armatūros skaičių vienetais, trečias – šios armatūros skersmenį. Paskutinis skaičius nurodo numerį pogrupyje. Pvz., sijos žymuo SL2-3×6-1 reiškia siją, pagamintą iš lengvojo betono, ji priklauso 2-ai bandinių grupei, tempiamojoje zonoje armuota 3×Ø6 strypais ir yra pirmas bandinys pogrupyje.

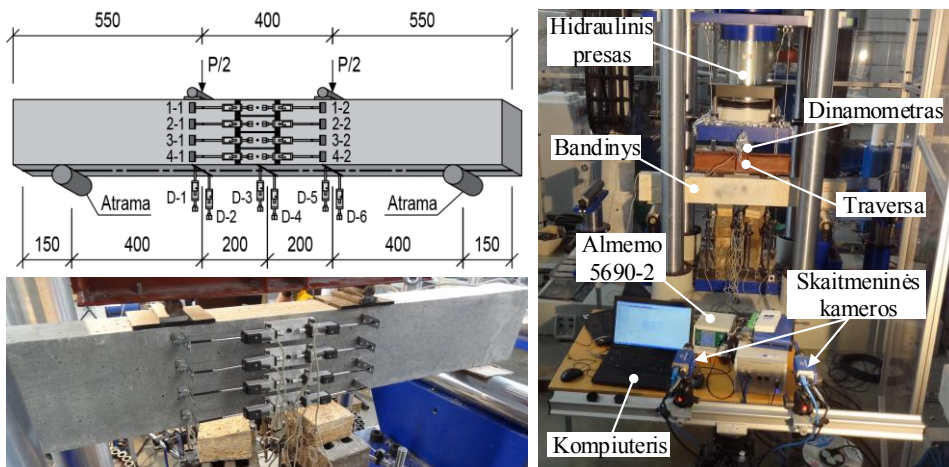
3.4 lentelė. Eksperimentinių armuoto betono sijų charakteristikos

Table 3.4. Characteristics of reinforced lightweight concrete experimental beams

Eil. Nr.	Grupė	Sijos žymuo	Naudotas mišinys	Užpildo tipas	Bandymo diena	<i>h</i> , mm	<i>b</i> , mm	<i>d</i> , mm	<i>a</i> ₁ , mm	<i>a</i> ₂ , mm	<i>A</i> ₁ , cm ²	<i>A</i> ₂ , cm ²	<i>ρ_R</i> , %
1	1	SL1-2×6-1	DR-K10	K(2-4)	42	198	104	175	23	25	0,565	0,565	0,310
2		SL1-2×6-2				200	102	180	20	29			0,308
3		SL1-2×8-1			41	199	102	177	22	28	1,005		0,556
4		SL1-2×8-2				200	102	177	23	26			0,557
5		SL1-2×10-1				199	102	175	24	27	1,571		0,882
6		SL1-2×10-2				200	99	175	25	24			0,908
7	2	SL2-2×6-1	K1920 ¹		29	200	104	173	27	32	0,565	0,565	0,302
8		SL2-2×6-2				199	104	172	27	25			0,306
9		SL2-2×6-3				197	106	172	25	26			0,302
10		SL2-3×6-1			28	200	102	176	24	30	0,820		0,457
11		SL2-3×6-2				200	104	178	22	31			0,446
12	3	SL3-2×6-1	K1920 ²		141	198	103	176	22	32	0,565	0,565	0,312
13		SL3-3×6-1				198	105	175	23	30	0,820		0,446
14		SL3-2×8-1				199	102	175	24	36	1,005		0,563
15		SL3-2×10-1				200	99	175	25	31	1,571		0,907
16	4	SL4-2×6-1	PS9 ¹	PS(0,5-1)	7	197	104	174	23	23	0,565	0,565	0,312
17		SL4-2×6-2	PS9 ²			198	105	177	21	23			0,305
18		SL4-2×8-1	PS9 ³			199	103	177	22	23	1,005		0,551
19		SL4-2×8-2	PS9 ⁴			197	103	174	23	23			0,562
20	5	SN5-2×6-1	NB	Granitas 2-5 mm	556	199	102	174	25	23	0,565	0,565	0,318
21		SN5-2×8-1				198	103	173	25	23	1,005		0,564
22		SN5-2×10-1			557	198	101	173	25	23	1,571		0,899

3.3. Bandymo metodika ir įranga

Sijos išbandytos keturių taškų schema sudalijant siją į tris vienodas 400 mm zonas: vidurinę grynojo lenkimo zoną ir dvi kraštines. Bandymo schema ir įrangos išdėstymas pateiktas 3.2 paveiksle. Tyrimų metu matuoti vertikalūs poslinkiai grynojo lenkimo zonoje (3.2 pav. davikliai nuo D–1 iki D–6) ir paviršiaus deformacijos keturiuose skirtinguose skerspjūvio aukščio lygiuose (3.2 pav. jutikliai nuo 1–1 iki 4–2). Deformacijų ir poslinkių matavimui naudoti 0,001 mm tikslumo tiesiniai kintamojo poslinkio jutikliai (angl. *linear variable displacement transducers, LVDT*). Apkrova matuota naudojant 500 kN skaitmeninį dinamometrą (tikslumas – 0,1 kN) ir buvo tolygiai didinama kontroliuojant poslinkį jėgos pridėjimo vietose (apkrovimo greitis – 0,006 mm/s). Visi prietaisai sujungti su „Almemo 5690-2“ duomenų kaupikliu. Prietaisų vertės buvo nuskaitomos kas vieną sekundę naudojant kompiuterinę programą „Ahlborn AMR Win Control Software“. Sijos bandytos iki tempiamosios armatūros takumo ribos. Papildomai paviršiaus deformacijų kitimui ir plyšių formavimosi stebėjimui naudotos dvi „Imager E-lite 5M“ skaitmeninės vaizdo kameros (3.2 pav.). Bandymų metu skaitmenine vaizdo kamera nustatytame apkrovos lygmenyje fiksuoti pasirinkto ruožo skaitmeniniai vaizdai, kurie vėliau apdoroti skaitmeninio vaizdo koreliacijos metodu (angl. *digital image correlation method, DICM*). Skaitmeniniuose vaizduose stebimos sijos taškų koordinatės laikui bėgant, o iš šių koordinatžių pokyčio gaunamos sijų deformacijos atitinkamame apkrovos lygmenyje.



3.2 pav. Apkrovimo ir jutiklių išdėstymo schema bei bandymo įranga

Fig. 3.2. Test set-up and photography of the test

Vietiniai deformacijų matavimo efektai gali turėti didelę įtaką gelžbetoninio elemento lenkiamajam standumui (Gribniak *et al.* 2017). Norint sumažinti rezultatų paklaidas, momentų kreivių diagramos sudarytos imant vidutines deformacijų vertes, gautas apdorojus matavimų rezultatus skirtinguose lygiuose. Kreiviai pagal skirtingose grynojo lenkimo zonos sluoksniuose nustatytas deformacijas apskaičiuojami pagal tokią formulę:

$$\kappa = \frac{1}{6} \sum_{l=2}^4 \sum_{k=1}^{l-1} \frac{\varepsilon_k - \varepsilon_l}{h_{kl}}, \quad (3.1)$$

čia ε_k ir ε_l – vidutinės deformacijos išilgai k ir l jutiklių linijos (3.2 pav.); h_{kl} – atstumas tarp šių linijų ($k, l = 1-4, k \neq l$). Naudojant tą pačią formulę, apskaičiuotos momentų ir kreivių diagramos apdorojant skaitmeninių kamerų rezultatus.

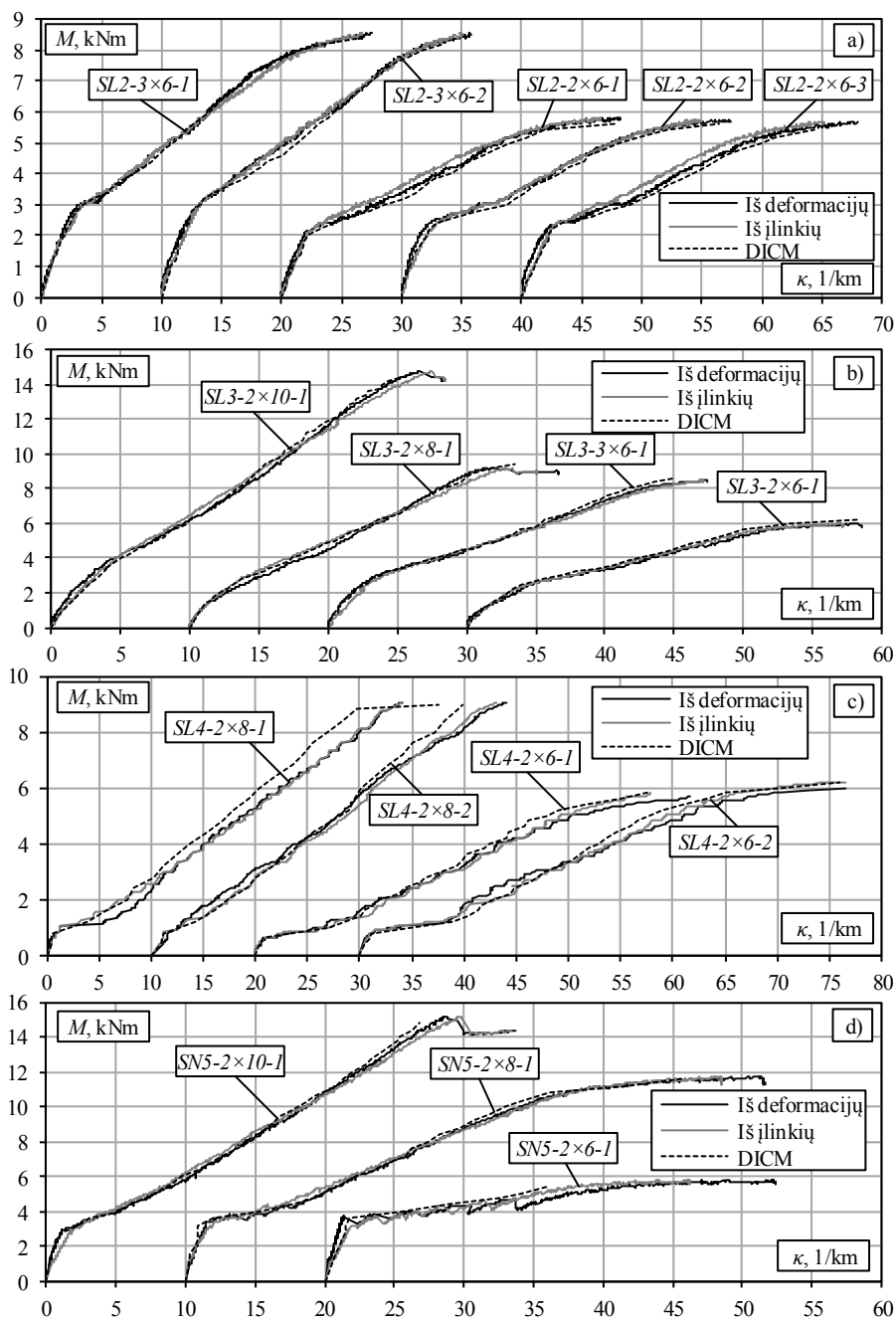
Kreiviai pagal grynojo lenkimo zonoje matuotus poslinkius rezultatų apskaičiuoti pagal formulę, įvertinant poslinkius grynojo lenkimo zonos viduryje ir jos kraštuose:

$$\kappa = \frac{2(\Delta_m - \Delta_k)}{\left(\frac{a}{2}\right)^2 + (\Delta_m - \Delta_k)^2}, \quad (3.2)$$

čia Δ_m – vidutinis poslinkis grynojo lenkimo zonos viduryje; Δ_k – vidutinis poslinkis jėgos pridėjimo pjūvyje; a – grynojo lenkimo zonos ilgis.

3.4. Eksperimentinių tyrimų rezultatai

Eksperimentiniai armuoto lengvojo betono sijų tyrimų rezultatai panaudoti eksperimentinių momentų ir kreivių diagramoms sudaryti. Gauti rezultatai pateikiami 3.3 paveiksle. Kiekvienai sijai trimis skirtingais būdais sudarytos diagramos: iš deformacijų matavimo (3.3 paveiksle žymimi „Iš deformacijų“), iš įlinkių matavimų (3.3 pav. žymimi „Iš įlinkių“) ir apdorojus skaitmeninės kameros rezultatus (3.3 pav. žymimi „DICM“). Kadangi SL1 sijų grupei šie rezultatai pateikti Rumšio (2014) darbe, 3.3 paveiksle jie nepateikiami. Iš paveikslo matyti, kad daugumos sijų skirtingais metodais gauti grafikai sutampa. Tai rodo gautų rezultatų patikimumą. Vis dėlto kai kurių sijų vienu iš būdų gauti rezultatai nesutampa su likusiais (pvz., 3.3 c paveiksle SL4-2×8-1 sijos rezultatuose nesutampa DICM grafikas). Šiuo atveju tolimesniuose tyrimuose imtas vienas grafikas iš dviejų sutampančių. Sijoms, kurioms visi būdai tarpusavyje sutampa, tolesniuose tyrimuose naudojami grafikai, gauti matuojant deformacijas.



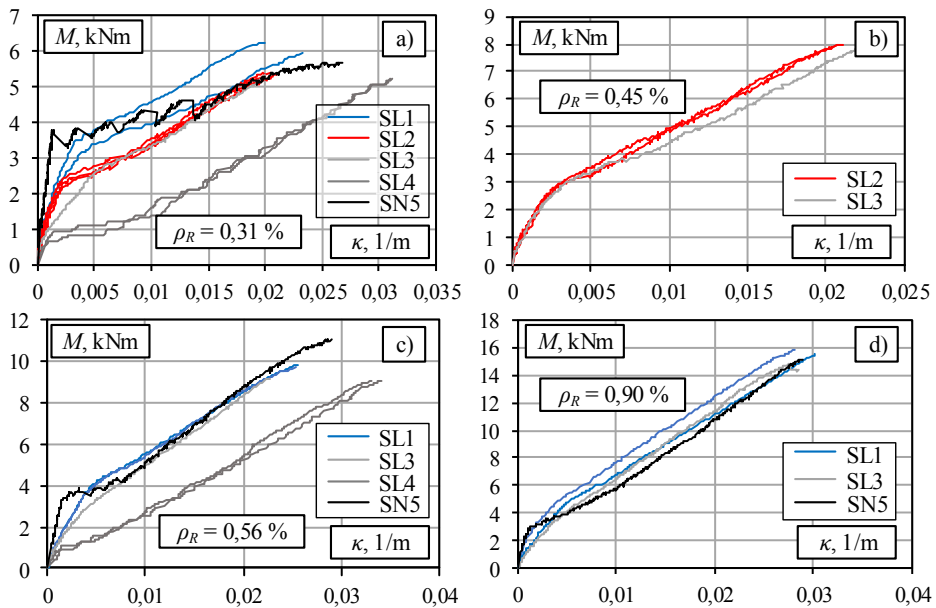
3.3 pav. Lenkiamųjų elementų eksperimentinės momentų ir kreivių diagramos

Fig. 3.3. Moment – curvature diagrams of experimental flexural elements

Pagal armavimo procentą sugrupuotos eksperimentinių sijų momentų ir kreivių diagramos pateiktos 3.4 paveiksle. Šiame paveiksle taip pat pateikti ir SL1 sijų grupės grafikai. Tos pačios grupės sijos žymimos vienoda spalva. 3.4 a paveiksle pateikiamos 0,31 % armavimo procento sijų diagramos. Čia iš viso atidėti devynių sijų grafikai, kurie apima bent po vieną kiekvienos bandymų grupės elementą. Kaip matyti iš 3.4 lentelės, SL2 ir SL3 grupių sijoms betonuoti naudota ta pati betono mišinio sudėtis, tačiau betono amžius apkraunant gerokai skiriasi (SL2 ir SL3 grupių sijos bandytos praėjus atitinkamai 29 dienoms ir 141 diena po užbetonavimo). Tai lėmė, kad SL3 grupės sijoms stadijoje iki apkrovimo pasireiškė daug didesnės betono susitraukimo deformacijos (žr. 3.2 lentelę). Tai patvirtina šioms sijoms gautų lenkimo momentų ir kreivių diagramų pobūdis. Kaip matyti iš 3.4 a paveikslą pateiktos diagramos, SL2 sijų grupei eksperimentinis pleišėjimo momentas yra šiek tiek didesnis nei 2 kNm. SL3 grupės sijoms pleišėjimo momentas yra mažesnis nei 1 kNm. Stabilizavusis pleišėjimui (prie ~2,8 kNm), SL2 ir SL3 grupių kreivės sutampa. Vis dėlto SL3 grupės sijų betono susitraukimo deformacijos yra apie aštuonis kartus didesnės. Teoriškai minėtos grupės sijų kreivės turėtų būti žemiau nei SL2 grupės sijų, t. y. jų standumas turėtų būti mažesnis. Tai galima paaiškinti tuo, kad SL3 grupės sijų efektyvusis aukštis $d = 176$ mm (žr. 3.4 lentelę), o SL2 grupių d svyruoja nuo 172 iki 173 mm. Taigi sija iš SL3 grupės yra standesnė, o esant mažam armavimo procentui (vidutiniškai 0,31 %) net ir nedidelis naudingo aukščio skirtumas yra ypač reikšmingas. Taip kompensuojama didesnio susitraukimo įtaka elemento įtempių ir deformacijų būviui. SL4 grupės sijose, kurioms naudotas labai lengvas betonas ($\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$), pasireiškia ypač didelės susitraukimo deformacijos ($\varepsilon_{shr} = -1,05 \cdot 10^{-3}$), dėl kurių dar prieš apkrovimą galėjo atsirasti elementų standumą mažinančių vidinių mikroplyšių. Šiems elementams gauta labai žema pleišėjimo riba ($M_{cr} < 1 \text{ kNm}$) bei didesnis kreivis, lyginant su kitų grupių sijomis. Tai lemia mažas šios grupės sijoms gaminti naudoto betono tamprumo modulis ($E_{lcm} = 11,5 \text{ GPa}$). Dėl minėtų priežasčių šio betono mišinių praktinis naudojimas gali būti apribotas. Šios tendencijos visų pirma susijusios su tinkamumo ribinio būvio apribojimais.

Nagrinėjant tradicinio betono SN5 grupės sijų rezultatus (3.4 a pav.), galima pastebėti, kad pleišėjimo apkrova yra didesnė už LB sijų pleišėjimo apkrovą. Be to, dėl didesnio tamprumo modulio stadijoje iki pleišėjimo apkrovos sijų standumas yra didesnis. Dėl apytikriai vienodo tradicinio ir lengvojo betonų gniuždomojo stiprio SN5 grupės sijų momentų ir kreivių diagramos atlaikomojo lenkimo momento lygmeniu priartėja prie atitinkamų parametrų LB sijų diagramų.

3.4 b pav. pateiktas dviejų SL2 grupės sijų bei vienos SL3 grupės sijos momentų ir kreivių diagramų sugretinimas. Visų sijų vidutinis armavimo procentas yra 0,45 %. Iš pateiktų diagramų matyti, kad SL3 grupės sijos dėl didesnių susitraukimo deformacijų kreiviai yra šiek tiek didesni, dėl to kreivė yra žemiau SL2 grupės elemento grafikų.

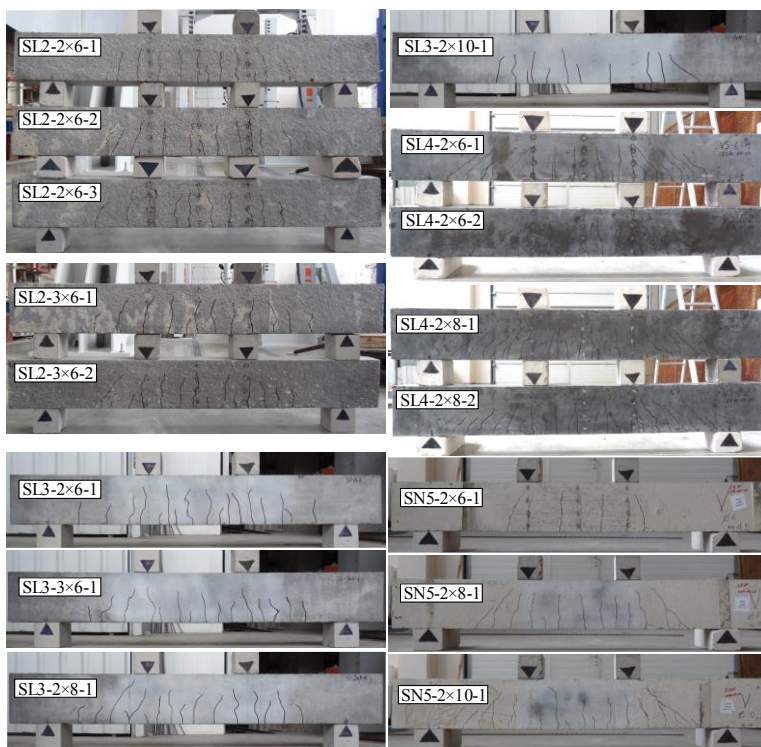


3.4 pav. Skirtingų grupių, vienodo armavimo procento sijų rezultatų sugretinimas
Fig 3.4. Comparison of the results of different beam groups with same reinforcement ratios

3.4 c paveiksle pateikiamos 0,56 % armavimo procento sijų iš SL1, SL3, SL4 ir SN5 grupių momentų ir kreivių diagramos. Šiuose grafikuose gautos panašios tendencijos kaip ir 3.4 a paveiksle pateiktoms sijoms. Labiausiai išsiskiria SL4 grupės elementai, kuriuose dėl susitraukimo deformacijų pleišėjimo riba ir elementų standumas daug mažesnis už kitų grupių elementų.

3.4 d paveiksle pateikiamos 0,90 % armavimo procento elementų diagramos. Iš paveikslo matyti, kad dėl didesnių SN5 grupės bandinių susitraukimo deformacijų bei mažesnio naudingo aukščio tradicinio betono sijos (SN5 grupė) momentų ir kreivių diagrama yra žemiau nei lengvojo betono sijų.

Eksperimentinių sijų pleišėjimo schemas pateiktos 3.5 paveiksle. Pleišėjimo aspektai šiame darbe nuodugniau nenagrinėjami, o gauti duomenys ateityje gali būti panaudoti kuriant ar tobulinant gelžbetoninių elementų (taip pat ir lengvojo betono) fizikinius pleišėjimo modelius ar analizės metodus.



3.5 pav. Armuoto lengvojo ir normaliojo betono sijų plyšių schemas
Fig. 3.5. Crack pattern of reinforced lightweight and ordinary concrete beams

3.5. Eksperimentinių ir teorinių rezultatų sugretinimas

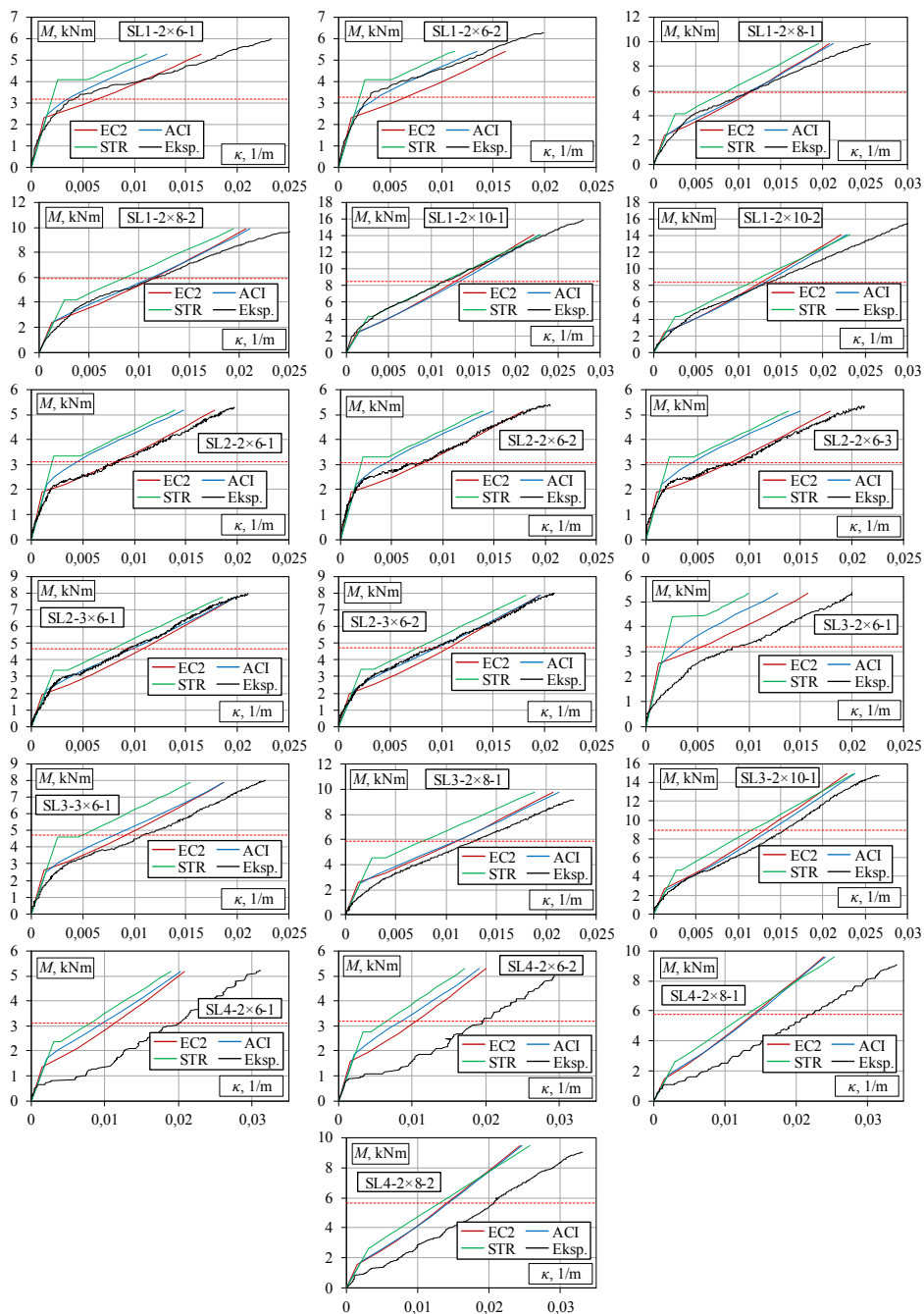
Eksperimentinės ir teorinės kreivės lyginamos eksploatacinę apkrovą apytikriai atitinkančiu lenkimo momentų lygmeniu $M_{naud} = 0,6M_{Rm}$, čia M_{Rm} – pagal EC2 normas apskaičiuotas teorinis vidutinis lenkiamojo elemento atlaikomas momentas. Pagamintų armuotų LB sijų (3.1 pav. ir 3.4 lentelė) eksperimentinių ir teorinių rezultatų sugretinimas pateikiamas 3.6 pav. Iš patektų diagramų matyti, kad visų normų metodais teoriniai rezultatai, esant tampriai stadijai, iki pleišėjimo gerai sutampa su eksperimentiniais. Daugumai sijų EC2 ir ACI normomis gaunama gera teorinės ir eksperimentinės pleišėjimo apkrovos atitiktis (pvz., SL2-2x6-2, SL2-3x6-1). STR normomis prognozuojama pleišėjimo apkrova pervertinama, t. y. yra didesnė už eksperimentais nustatytą (pvz., SL3-3x6-1, SL3-2x10-1). Projektavimo normų rezultatų sklaida pasireiškia stadijoje po supleišėjimo. Priklausomai nuo naudoto mišinio, bandymo dienų skaičiaus, susitraukimo

deformacijų, visomis projektavimo normomis gaunami įvairūs rezultatai. Kai kuriais atvejais bandomasis elementas yra standesnis, nei prognozuoja normos, t. y. pastarosiomis gaunami per dideli kreiviai, lyginant su eksperimentiniais. Kitais atvejais eksperimentiniai kreiviai yra didesni už teorinius.

Bandymų programoje galima išskirti SL4 grupės sijas, kurioms buvo naudotas labai lengvas betono mišinys ($\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$). Dėl didelių susitraukimo deformacijų ($\epsilon_{shr} = -1,05 \cdot 10^{-3}$) stadijoje iki apkrovimo bei betono mažo tamprumo modulio šių sijų pleišėjimo apkrova yra kur kas mažesnė už teorines. Šioms sijoms susitraukimo deformacijų vertinimas iki apkrovimo yra ypač svarbus, nes dar iki apkrovimo elementuose atsiranda nemaži tempimo įtempiai, lemiantys reikšmingą pleišėjimo momento sumažėjimą. Projektavimo normose šie efektai tiesiogiai nevertinami, todėl jais gaunamos nemažos paklaidos (pvz. SL4-2×6-1, SL4-2×8-1). Kita vertus, praktiniu požiūriu dėl palyginti mažo tamprumo modulio tokio betoną naudoti laikančiosioms konstrukcijoms galima tik tais atvejais, kai tinkamumo ribinio būvio reikalavimai nėra reikšmingi, pvz., lokaliems elementams. Kitais atvejais minėtų elementų įtempių ir deformacijų būviui įvertinti visose stadijose (taip pat ir apkrovimo) reikėtų taikyti alternatyvius inžinerinius arba skaitinius metodus bei suderintus fizikinius modelius.

Atlikus eksperimentinių ir teorinių kreivių sugretinimą nustatyta, kad silpnai armuotų (0,32 %) sijų (pvz., SL1-2×6-1, SL1-2×6-2, SL2-2×6-1) naudojimo apkrova M_{naud} yra artima pleišėjimo momentui. Todėl netiksliai prognozuojant pleišėjimo apkrovą galima gauti nemažas apskaičiavimo paklaidas.

Detalus visų sijų eksperimentinių ir teorinių rezultatų sugretinimas eksploatacinės apkrovos M_{naud} lygmeniu pateiktas 3.5 lentelėje. Šioje lentelėje kiekvienam elementui pateikiama naudojimo apkrovą atitinkančio lenkimo momento M_{naud} ir vidutinio atlaikomojo momento M_{Rm} vertės, skirtingų normų metodais apskaičiuotų ir eksperimentinės kreivių reikšmės, taip pat teorinių ir eksperimentinių kreivių santykiai (santykinės kreivių vertės). Pagrindiniai jų santykių statistiniai rodikliai: vidurkis (x_{vid}), standartinis nuokrypis (σ_{std}) ir variacijos koeficientas (V_k) – apibendrinti 3.5 lentelėje. Nagrinėjant visos LB bandymų programos (SL1–SL4 grupės) lyginamuosius rezultatus nustatyta, kad EC2 normų metodu gauta vidutinė teorinių ir eksperimentinių rezultatų paklaida sudaro 1,5 %. Vis dėlto gaunama nemaža rezultatų sklaida – standartinis nuokrypis $\sigma_{std} = 0,389$. Statistinė analizė rodo, kad tam tikrais atvejais EC2 normomis gali būti gaunami netikslūs rezultatai. STR normų metodu vidutinė teorinių ir eksperimentinių rezultatų paklaida sudarė 42,7 % ($x_{vid} = 0,573$, $\sigma_{std} = 0,241$), ACI metodu – 20,6 % ($x_{vid} = 0,794$, $\sigma_{std} = 0,263$). Lyginamoji analizė rodo, kad tiksliausi rezultatai gaunami EC2 normomis, o mažiausiai tikslūs – STR metodu. Būtina pabrėžti, kad visomis projektavimo normomis gaunamos per mažos kreivių vertės.



3.6 pav. Eksperimentinių ir teorinių momentų bei kreivių diagramų sugretinimas
Fig. 3.6. Comparison of experimental and theoretical moment-curvature diagrams

3.5 lentelė. Teorinių ir eksperimentinių kreivių palyginimas esant naudojimo apkrovai
Table 3.5. Comparison of theoretical and experimental curvature results at service load

Eil. Nr.	Žymuo	M_{nauds} , kNm	M_{Rm} , kNm	κ , 1/m				$\kappa_{teor}/\kappa_{exp}$		
				EC2	STR	ACI	Eksperimentas	EC2/Eksp	STR/Eksp	ACI/Eksp
1	SL1-2×6-1	3,16	5,27	0,00637	0,00199	0,00356	0,00396	1,607	0,502	0,899
2	SL1-2×6-2	3,25	5,42	0,00651	0,00202	0,00381	0,00295	2,205	0,685	1,289
3	SL1-2×8-1	5,91	9,85	0,01140	0,00847	0,01119	0,01128	1,011	0,751	0,993
4	SL1-2×8-2	5,91	9,85	0,01134	0,00839	0,01109	0,01144	0,992	0,734	0,970
5	SL1-2×10-1	8,46	14,10	0,01276	0,01142	0,01329	0,01160	1,101	0,984	1,146
6	SL1-2×10-2	8,45	14,08	0,01281	0,01155	0,01335	0,01377	0,931	0,839	0,969
7	SL2-2×6-1	3,11	5,18	0,00820	0,00205	0,00439	0,00820	1,000	0,251	0,536
8	SL2-2×6-2	3,09	5,15	0,00822	0,00206	0,00446	0,00790	1,040	0,261	0,565
9	SL2-2×6-3	3,09	5,15	0,00822	0,00208	0,00452	0,00894	0,920	0,233	0,505
10	SL2-3×6-1	4,67	7,79	0,01080	0,00790	0,00976	0,00936	1,154	0,844	1,043
11	SL2-3×6-2	4,73	7,89	0,01062	0,00771	0,00959	0,00927	1,145	0,831	1,035
12	SL3-2×6-1	3,19	5,31	0,00536	0,00186	0,00339	0,00863	0,621	0,216	0,393
13	SL3-3×6-1	4,71	7,86	0,00922	0,00493	0,00804	0,01081	0,853	0,457	0,744
14	SL3-2×8-1	5,87	9,78	0,01108	0,00770	0,01095	0,01279	0,866	0,602	0,856
15	SL3-2×10-1	8,96	14,94	0,01316	0,01169	0,01389	0,01555	0,846	0,751	0,893
16	SL4-2×6-1	3,10	5,17	0,01130	0,00791	0,00957	0,02004	0,564	0,395	0,478
17	SL4-2×6-2	3,17	5,29	0,01044	0,00644	0,00840	0,01948	0,536	0,331	0,431
18	SL4-2×8-1	5,76	9,60	0,01389	0,01300	0,01413	0,02192	0,634	0,593	0,645
19	SL4-2×8-2	5,67	9,46	0,01416	0,01313	0,01437	0,02066	0,685	0,635	0,696
							x_{vid}	0,985	0,573	0,794
							σ_{std}	0,389	0,241	0,263
							V_k	0,395	0,419	0,331

3.6 lentelė. Santykinių kreivių statistiniai parametrai
Table 3.6. Statistical parameters of relative curvatures

Eil. Nr.	Grupė	EC2/Eksp			STR/Eksp			ACI/Eksp		
		x_{vid}	σ_{std}	V_k	x_{vid}	σ_{std}	V_k	x_{vid}	σ_{std}	V_k
1	SL1	1,308	0,504	0,385	0,749	0,161	0,215	1,044	0,145	0,139
2	SL2	1,052	0,099	0,094	0,484	0,323	0,668	0,737	0,277	0,376
3	SL3	0,797	0,118	0,148	0,506	0,228	0,450	0,721	0,228	0,316
4	SL4	0,605	0,068	0,112	0,488	0,149	0,304	0,562	0,128	0,227

Kadangi skirtingoms sijų grupėms naudoti skirtingos sudėties LB mišiniai, 3.6 lentelėje kiekvienai sijų grupei pateiktos santykinų kreivių statistinės charakteristikos. Iš pateiktos lentelės matyti, kad EC2 metodu geri rezultatai gaunami SL2 grupės sijoms (paklaida – 5 %). SL1, SL3 ir SL4 grupei gautos didesnės paklaidos (atitinkamai 30, 20 ir 40 %). Tai galima paaiškinti tuo, kad, apskaičiuojant kreivius EC2 metodu, tiesiogiai nevertinama susitraukimo deformacijų įtaka stadijoje iki eksploatacijos (žr. 1.4.2 skirsnį). Šias tendencijas patvirtina SL2 grupės sijų rezultatai. Šių sijų susitraukimo deformacijos stadijoje iki apkrovimo buvo mažiausios, lyginant su kitais bandiniais ($\varepsilon_{shr} = -58 \cdot 10^{-6}$). Atitinkamai šiems elementams gautos ir mažiausios paklaidos. STR ir ACI metodais visoms grupėms gautas didesnis teorinių ir eksperimentinių rezultatų neatitikimas. STR normų metodo paklaidos sudaro nuo 25 % iki 51 %, o ACI metodu – nuo 4 % iki 44 %.

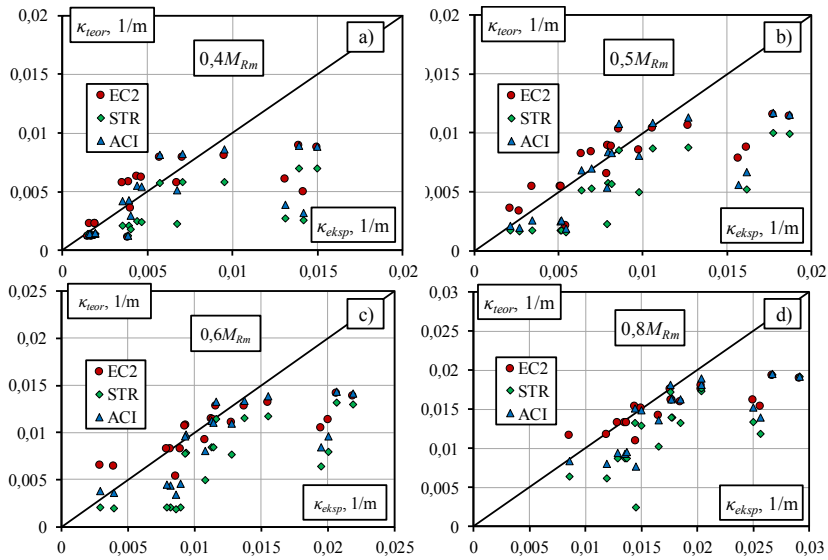
Papildomai 3.7 paveiksle grafiškai lyginamos eksperimentinės ir teorinės kreivės esant skirtingiems apkrovos lygiams: $0,4M_{Rm}$, $0,5M_{Rm}$, $0,6M_{Rm}$ (M_{naud}), $0,8M_{Rm}$. Esant $0,4M_{Rm}$ apkrovos lygiui EC2, STR ir ACI normų metodais gautos atitinkamai 3,4 %, 41,9 % ir 17,2 % vidutinės paklaidos. Apkrovos lygmenyje $0,5M_{Rm}$ vidutinės paklaidos minėtais metodais sudarė 2,0 %, 43,7 % ir 23,1 %. Eksploatacinės apkrovos lygmenyje $0,6M_{Rm}$ (M_{naud}) gautos 1,5 %, 42,7 % ir 20,6 % vidutinės paklaidos, o $0,8M_{Rm}$ lygyje – 10,3 %, 30,8 % ir 19,7 % paklaidos.

Darbe papildomai atlikta įvairių veiksnių (ρ_R , ρ , f_{lcm} , ε_{shr}) įtakos santykiniams kreiviams analizė. Gauti rezultatai pateikti 3.8 paveiksle, kuriame gautos tendencijos aproksimuotos koreliacine tiese. Rezultatai gauti remiantis naudojimo apkrovos lygmeniu. 3.8 a paveiksle pateikti rezultatai atitinka santykinų kreivių priklausomybę nuo armavimo procento ρ_R . Matyti, kad visų metodų tikslumas priklauso nuo ρ_R , o didžiausia sklaida pasireiškia esant mažam armavimo procentui.

Skaičiavimo tikslumo priklausomybė nuo betono tankio pateikta 3.8 b paveiksle. EC2 ir ACI metodais prognozuojami rezultatai priklauso nuo tankio, o STR koreliacinė tiesė – beveik horizontalioji. Kita vertus, STR normų metodu gaunamos didžiausios armuotų LB sijų skaičiavimo paklaidos.

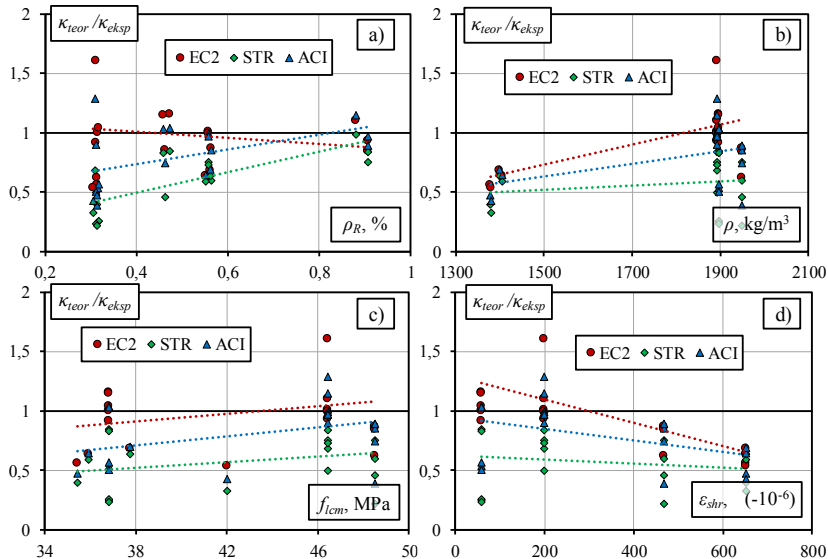
Normų skaičiavimo tikslumo priklausomybės nuo gniuždomojo LB stiprio pateiktos 3.8 c paveiksle. Iš jo matyti, kad visų normų prognozavimo tikslumas nedaug priklauso nuo gniuždomojo stiprio.

Susitraukimo deformacijų įtaka skaičiavimo rezultatams pateikiama 3.8 d paveiksle. Visiems metodams galioja akivaizdi tendencija – kuo didesnė susitraukimo deformacija, tuo didesnės skaičiavimo paklaidos. Tai dar kartą patvirtina šio efekto vertinimo būtinybę stadijoje iki eksploatacijos.



3.7 pav. Eksperimentinių ir teorinių kreivių palyginimas esant skirtingiems apkrovos lygiams

Fig. 3.7. Comparison of experimental and theoretical curves at different load levels



3.8 pav. Skirtingų skaičiavimo metodų tikslumo priklausomybė nuo: a) armavimo procento ρ_R ; b) tankio ρ ; c) gniuždomojo stiprio f_{cm} ; d) susitraukimo deformacijų ε_{shr}

Fig. 3.8. Accuracy of different calculation methods depending on: a) reinforcement ratio ρ_R ; b) density ρ ; c) compressive strength f_{cm} ; d) shrinkage deformations ε_{shr}

Apibendrinus teorinių ir eksperimentinių rezultatų lyginamosios analizės tendencijas, galima teigti, kad darbe išbandytų armuotų LB sijų kreiviai tiksliausiai prognozuojami EC2 normų metodu, tačiau juo gaunamų rezultatų sklaida yra didelė. Sklaidai sumažinti būtina modifikuoti EC2 metodą įvertinant armuotų LB sijų elgsenos ypatumus visose stadijose – nuo pagaminimo iki eksploatacijos. Toliau šiame darbe išbandytų sijų eksperimentinės lenkimo momentų ir kreivių diagramos panaudotos tempiamosios zonos betono fizikiniam modeliui išvesti.

3.6. Trečiojo skyriaus išvados

Apibendrinus trečiajame skyriuje pateiktus rezultatus galima teigti, kad:

1. Atlikus eksperimentinių momentų ir kreivių diagramų palyginimą su projektavimo normų EC2, STR ir ACI metodais gautomis teorinėmis diagramomis naudojimo apkrovos lygmenyje (kuris atitinka lenkimo momentą $M_{naud} = 0,6M_{Rm}$, čia M_{Rm} – teorinis atlaikomasis lenkimo momentas, apskaičiuotas pagal EC2 normas), nustatyta, kad tiksliausi rezultatai gauti EC2 normų metodu: teorinių ir eksperimentinių kreivių santykių vidurkis $x_{vid} = 0,985$, standartinis nuokrypis $\sigma_{std} = 0,389$. Būtina pabrėžti, kad EC2 metodu gaunama didelė rezultatų sklaida, t. y. tam tikrais atvejais juo gali būti gaunami netikslūs rezultatai. STR normų metodu gautos didžiausios paklaidos: $x_{vid} = 0,573$, $\sigma_{std} = 0,241$. ACI metodui gauti tokie rodikliai: $x_{vid} = 0,794$, $\sigma_{std} = 0,263$.
2. Bandymų programoje galima išskirti SL4 grupės sijas, kurioms buvo naudotas labai lengvas betono mišinys ($\rho = 1380 \text{ kg/m}^3$). Dėl didelių susitraukimo deformacijų ($\epsilon_{shr} = -1,05 \cdot 10^{-3}$) stadijoje iki apkrovimo ir betono mažo tamprumo modulio šių sijų pleišėjimo apkrova yra gero-kai mažesnė už teorines. Projektavimo normose šie efektai tiesiogiai nevertinami, todėl jais gaunamos nemažos paklaidos. Tokį betoną naudoti laikančiosioms konstrukcijoms galima tik tais atvejais, kai tinkamumo ribinio būvio reikalavimai nėra reikšmingi.
3. Nagrinėtų normų metodikose tiesiogiai nevertinama betono susitraukimo deformacijų įtaka stadijoje iki apkrovimo. Žinant, kad lengvojo betono susitraukimo deformacijos gali būti daug didesnės nei tradicinio betono, jo įtakos neįvertinimas gali būti kertinis aspektas projektavimo normų metodų tikslumui. Atlikta teorinių ir eksperimentinių rezultatų analizė patvirtino, kad nagrinėtų normų metodams galioja akivaizdi tendencija: kuo didesnė susitraukimo deformacija, tuo didesnės skaičiavimo paklaidos. Siekiant tiksliau prognozuoti armuoto LB elementų elgseną ir gauti mažesnę teorinių rezultatų sklaidą, būtina

įvertinti šių elementų elgsenos ypatumus visose stadijose nuo pagaminimo iki eksploatacijos. Tam tikslui gali būti taikomi alternatyvūs inžineriniai arba skaitiniai metodai bei suderinti fizikiniai modeliai.

Lengvojo betono fizikinis modelis ir lenkiamųjų elementų deformacijų analizė

VG TU mokslininkų grupės pasiūlyta armuoto betono elementų fizikinio modeliavimo koncepcija, kuria remiantis supleišėjusio tempiamojo betono fizikinius modelius galima gauti iš lenkiamųjų gelžbetoninių elementų momentų ir kreivių (įlinkių) diagramų. Darbe, naudojant šį algoritmą, iš eksperimentinių momentų ir kreivių diagramų gautos tempiamosios zonos lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos, kurios kartu įvertina susitraukimo deformacijų įtaką stadijoje iki apkrovimo. Atlikus gautų diagramų analizę, pasiūlytas armuoto lengvojo betono tempiamosios zonos modelis. Šis modelis integruotas į lenkiamųjų elementų deformacijų skaitinę analizę taikant baigtinių elementų programą ATENA. Modelio atitiktis įvertinta atlikus kitų autorių literatūroje paskelbtų eksperimentinių sijų skaitinį modeliavimą. Gauti rezultatai palyginti su eksperimentiniais ir gautaisiais, taikant EC2, STR ir ACI metodus. Skyriaus pabaigoje atliktas realių matmenų konstrukcinių elementų (plokščių ir sijų) skaitinis modeliavimas ir analizė. Nagrinėti iš lengvojo ir tradicinio betono pagaminti vienodo stiprio ir armavimo intensyvumo elementai. Tyrimų metu atskleistas galimas pagrindinės armatūros kiekio sumažinimas lengvojo betono elementuose, užtikrinant priimtus saugos ir tinkamumo ribinių būvių reikalavimus. Skyriaus tematika paskelbti keturi straipsniai (Kaklauskas *et al.* 2018; Rumšys *et al.* 2014, 2015; Rumšys 2014).

4.1. Fizikinio modeliavimo algoritmas

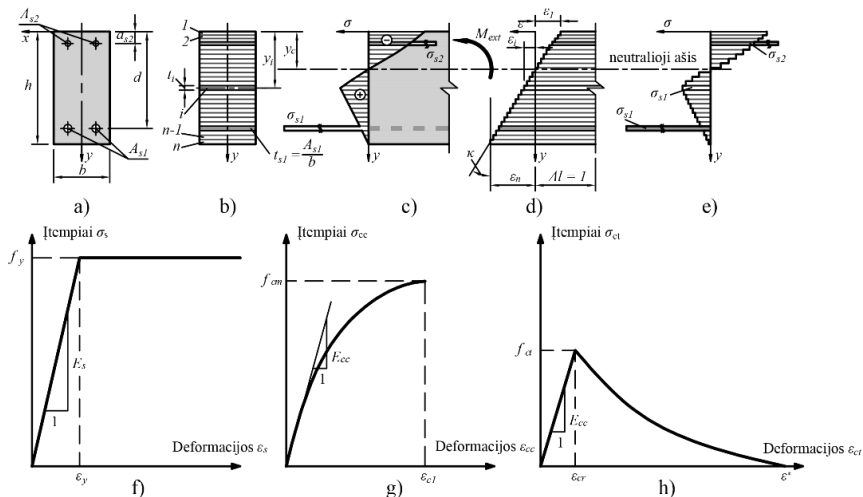
Poskyryje pateikiamas Kaklauskio ir Ghaboussi (2001) pasiūlytas integralinis metodas supleišėjusio tempiamojo betono vidutinių įtempių ir vidutinių deformacijų diagramoms nustatyti iš lenkiamųjų gelžbetonių elementų eksperimentinių duomenų. Atvirkštinio uždavinio matematinis algoritmas nuodugnai aptartas Kaklauskio (2001), Gribniak (2009), Girdžiaus (2011) ir kt. darbuose. Čia pateikiami tik pagrindiniai šio algoritmo aspektai.

Lenkiamojo gelžbetoninio elemento skerspjuvis pateiktas 4.1 a paveiksle. Skerspjuvis sudalijamas į horizontalius betono ir armatūros sluoksnius (4.1 b pav.). Armatūros strypai pakeičiami ekvivalentinio skerspjuvio armatūros sluoksniu. Metodas paremtas iteraciniu skaičiavimu, medžiagų atsparumo formulėmis bei armatūros (4.1 f pav.), gniuždomojo (4.1 g pav.) ir tempiamojo (4.1 h pav.) betono diagramų taikymu. Skerspjuvio kreivis ir deformacijos kiekviename sluoksnyje apskaičiuojamos pagal klasikinės medžiagų mechanikos formules.

Kai žinomos armatūros, gniuždomojo ir tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos (4.1 f, g, h pav.), atliekant iteracinį skaičiavimą kiekviename skerspjuvio sluoksnyje galima nustatyti deformacijas ε_i , įtempius σ_i ir kirstinį deformacijų modulį $E_{i,sec} = \sigma_i / \varepsilon_i$. Kiekvienam sluoksniui gauta kirstinio deformacijų modulio vertė palyginama su ankstesnėje iteracijoje imta arba apskaičiuota reikšme. Skaičiuojama tol, kol pasiekiamas nustatytas tikslumas. Deformacijų ir įtempių pasiskirstymas elemento skerspjuvyje, taikant sluoksnių metodą, pavaizduotas 4.1 d ir e paveiksluose.

Šiame darbe spręstas atvirkštinis uždavinys, kurio tikslas – iš eksperimentinių armuoto LB sijų momentų ir kreivių duomenų nustatyti tempiamosios zonos betono fizikinio modelio parametrus. Armatūros ir gniuždomojo betono fizikiniai modeliai yra žinomi. Atvirkštinio uždavinio sprendimo algoritmas (Kaklauskas 2004; Gribniak 2009) taip pat grindžiamas sluoksnių modeliu (4.1 a–e pav.) bei įtempių ir deformacijų diagramos nustatymu skerspjuvio kraštiniam tempiamojo betono sluoksniui. Skaičiuojama iteracijomis, didėjant išoriniam lenkimo momentui. Kiekvienam lenkimo momento prieaugiui ieškomos įtempių ir deformacijų diagramos pradinė kirstinio modulio vertė imama lygi 0 ($E_{i,0} = 0$) ir sprendžiant tiesioginį uždavinį apskaičiuojamas kreivis $\kappa_{calc,i}$. Jeigu skirtumas tarp apskaičiuoto ir eksperimentinio kreivio $\kappa_{obs,i}$ viršija nustatytą paklaidą Δ , skaičiavimai kartojami taikant kompleksinį Niutono ir Rafsono bei bisekcijos metodą (Gribniak 2009) tol, kol paklaida neviršija nustatytos vertės. Kiekvienoje iteracijoje apskaičiuojamas kirstinis deformacijų modulis $E_{i,k}$. Kai randamas sprendinys, gautoji $E_{i,k}$ vertė fiksuojama ir taikoma kitiems apkrovimo žingsniams. Pasiekus didžiausiąją momento vertę, skaičiavimai baigiami. Tokiu būdu randami visi

tempiamojo lengvojo betono suminių vidutinių įtempių ir deformacijų diagramos taškai. Skaičiavimo metodika detaliau aprašyta Gribniak (2009) darbe.



4.1 pav. Sluoksnių modelis ir medžiagų fizikiniai modeliai: a–e) sluoksnių modelis; f) plieno įtempių ir deformacijų diagrama; g) gniuždomojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagrama; h) tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagrama

Fig. 4.1. Layered model and constitutive models of materials: a–e) layer model; f) stress-strain diagram of steel; g) stress-strain diagram of lightweight concrete in compression; h) stress-strain diagram of lightweight concrete in tension

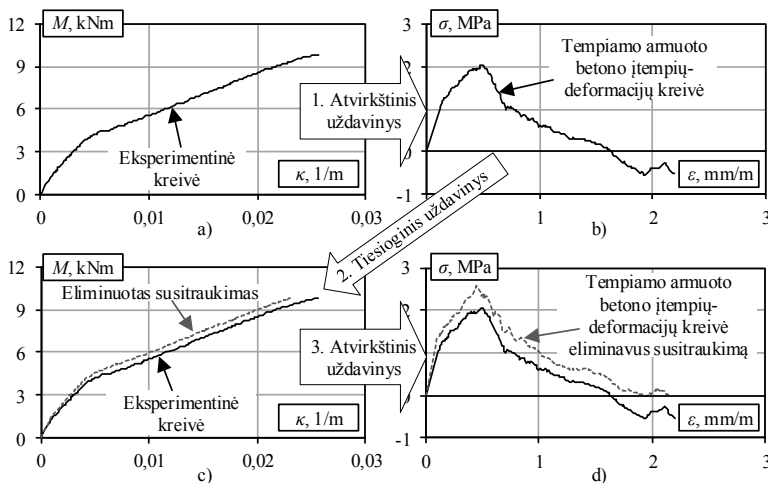
4.2. Tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų fizikinis modelis

Tempiamo armuoto lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos buvo gautos pagal 4.1 skyriuje aprašytą metodiką ir atliekant trijų žingsnių skaičiavimo algoritmą susitraukimo deformacijų įtakai stadijoje iki apkrovimo eliminuoti (Kaklauskas ir Gribniak 2011). Algoritmo pavyzdys pateiktas 4.2 paveiksle. Pirmuoju žingsniu, naudojant eksperimentinę momentų ir kreivių diagramą (4.2 a pav.), gaunama tempiamojo armuoto betono įtempių ir deformacijų kreivė (4.2 b pav.). Antruoju žingsniu gauta kreivė naudojama tiesioginiame uždavinyje, papildomai įvertinant susitraukimo deformacijas. Tokiu būdu gautos momentų ir kreivių diagramos, eliminuojant susitraukimo deformacijų įtaką (4.2 c pav.). Trečiuoju žingsniu dar kartą sprendžiamas atvirkštinis uždavinys naudojant antruoju žingsniu gautą momentų ir kreivių diagramą. Taikant tokią strategiją gaunamos tempiamojo armuoto betono įtempių ir deformacijų kreivės, kuriose eliminuota betono susitraukimo įtaka stadijoje iki apkrovimo (4.2 d pav.). Šis algoritmas

pritaikytas 3 skyriuje pateiktoms eksperimentinėms sijoms, priėmus bandymais gautas momentų ir kreivių diagramas (3.3 pav.). Skirtingo armavimo sijoms iš eksperimentinių priklausomybių gautos normalizuotos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų diagramos pateiktos 4.3 paveiksle. Šiose diagramose kylanti dalis atitinka nesupleišėjusio betono elgseną, o krįtančioji dalis – bendrą supleišėjusios zonos betono ir armatūros sąveiką. Kuo mažesnis elemento armavimo procentas, tuo betono ruožuose tarp plyšių įtaka bendram lenkiamojo elemento standumui yra didesnė. Šios įtakos dydį apibūdina įtempių ir deformacijų diagrama apribotas plotas.

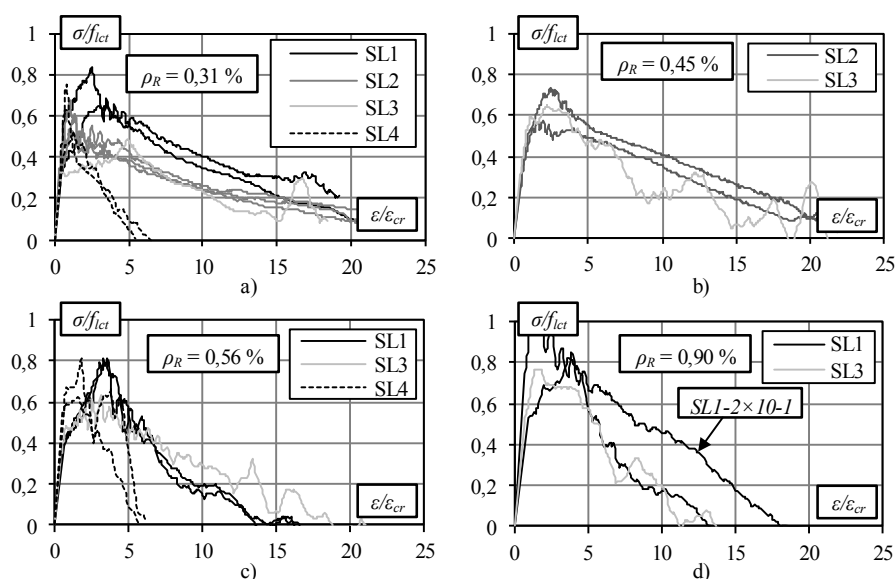
Analizuojant gautus rezultatus nesunku pastebėti, kad SL4 grupės sijų (4.3 a pav.) ir (4.3 c pav.) (pažymėta juoda brūkšnine linija) normalizuotos įtempių ir deformacijų diagramos išsiskiria iš kitų. Šių diagramų krįtančioji dalis yra nedidelė, t. y. tempiamojo betono įtaka sijų standumui yra nereikšminga. Tam įtakos turi išskirtinai mažas elemento standumas. Kaip jau aptarta 3 skyriuje, SL4 grupės elementai yra nedidelio tūrinio svorio ir praktiniu požiūriu dėl per mažo standumo laikančiosioms konstrukcijoms gali būti taikomos tik išskirtiniais atvejais. Dėl šios priežasties, išvedant tempiamojo betono fizikinį modelį, šie elementai nėra nagrinėjami.

Iš 4.3 d paveikslo matyti, kad elementui SL1-2×10-1 gauta diagrama nesutampa su kitų dviejų panašių parametrų sijų kreivėmis. Tokį nesutapimą galbūt lėmė neapibrėžtumai, susiję su bandymų metodika bei sijų geometriniais ir mechaniniais rodikliais. Tolesniuose tyrimuose į šio elemento duomenis taip pat neatsižvelgta.



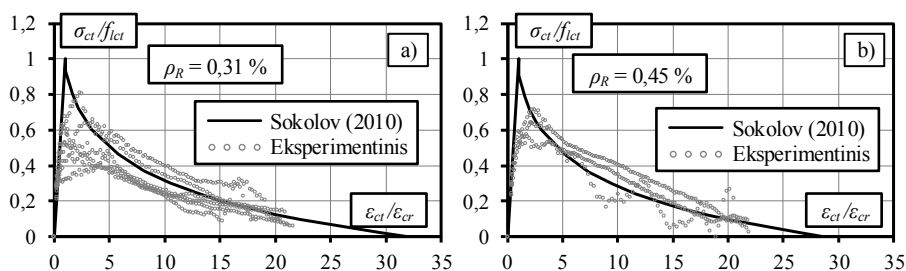
4.2 pav. Trijų žingsnių, tempiamojo armuoto betono įtempių ir deformacijų kreivės, eliminavus susitraukimo poveikį, gavimo algoritmas

Fig. 4.2. Three step obtaining of the shrinkage free stress-strain diagram of reinforced lightweight concrete in tension



4.3 pav. Normalizuotos tempiamojo lengvojo betono įtempių ir deformacijų diagramos

Fig. 4.3. Normalised stress-strain diagrams of lightweight concrete in tension



4.4 pav. Eksperimentinių sijų normalizuotų įtempių ir deformacijų kreivių palyginimas su Sokolov (2010) modeliu

Fig. 4.4. Normalised stress-strain diagrams comparison of experimental beams with Sokolov (2010) model

Mažai armuotų sijų ($\rho_R = 0,31\%$ ir $\rho_R = 0,45\%$) normalizuotų eksperimentinių diagramų taškai pateikti 4.4 paveiksle. Jie palyginti su Sokolov (2010) pasiūlytu tempiamojo sustandėjimo modeliu normaliojo betono sijoms. Nustatyta, kad Sokolov (2010) siūlomojo modelio krintančioji diagramos dalis gerai atitinka lengvojo betono sijų duomenis. Krintančioji dalies forma, supleišėjus elementui, iš dalies priklauso nuo armatūros ir betono sąveikos ypatumų. Lengvojo ir tradicinio betono diagramų krintančiųjų dalių sutapimas rodo, kad nagrinėjamos sijoms LB ir armatūros sąveika gali būti aproksimuota ta pačia funkcija kaip ir

tradicinio betono elementams. Šias prielaidas patvirtina Bogas *et al.* (2014) ir Holschemacher ir Ali (2017) atlikti tyrimai, kuriais nustatyta, kad armatūros sukibimo įtempiai lengvajame betone yra tokie patys kaip ir tradiciniame. Kita vertus, vyraujančios tendencijos šioje srityje yra prieštaringos. Kai kurie autoriai pažymi (Walraven *et al.* 1995), kad armatūros ir LB sukibimas yra prastesnis nei įprastajame betoniniame elemente. Tai visų pirma gali lemti naudojamų užpildų ir cementinės matricos mechaninės savybės. Praplėtus eksperimentinių duomenų imtį ir įvertinus lengvojo betono sudėties ypatumus, šioje srityje būtina atlikti papildomus tyrimus.

Analizuojant armuoto LB elementų pleišėjimo ribą, pastebėta, kad maksimalūs įtempiai lengvojo betono sijoms yra mažesni už pagal EC2 normas apskaičiuotą tempiamąjį stiprį. Maksimalių įtempių sumažėjimas gali būti susietas su mažesniu lengvojo užpildo mechaniniu atsparumu lyginant su tradiciniu sunkiuoju užpildu. Didėjant apkrovai plyšiai pirmiausia formuojasi lengvajame užpilde, o vėliau cementinėje matricoje. Jiems susijungus susiformuoja vientisas plyšys, bylojantis apie pleišėjimo ribos pasiekimą. Kitaip tariant, lengvojo betono plyšių formavimosi mechanizmas yra kiek kitoks nei tradiciniame betone. Šie aspektai nuodugniau aptarti šaltinyje (Chi *et al.* 2003). Panašų efektą, tyrinėjant normaliojo betono tempiamojo sustandėjimo poveikį pažeistoms sijoms (pažeisti cementiniai hidratacijos ryšiai), pastebėjo Gribniak *et al.* (2015). Nustatyta, kad struktūriniai betono defektai gali būti modeliuojami sumažinant maksimalius įtempius tempiamojo betono vidutinių įtempių ir deformacijų diagramoje.

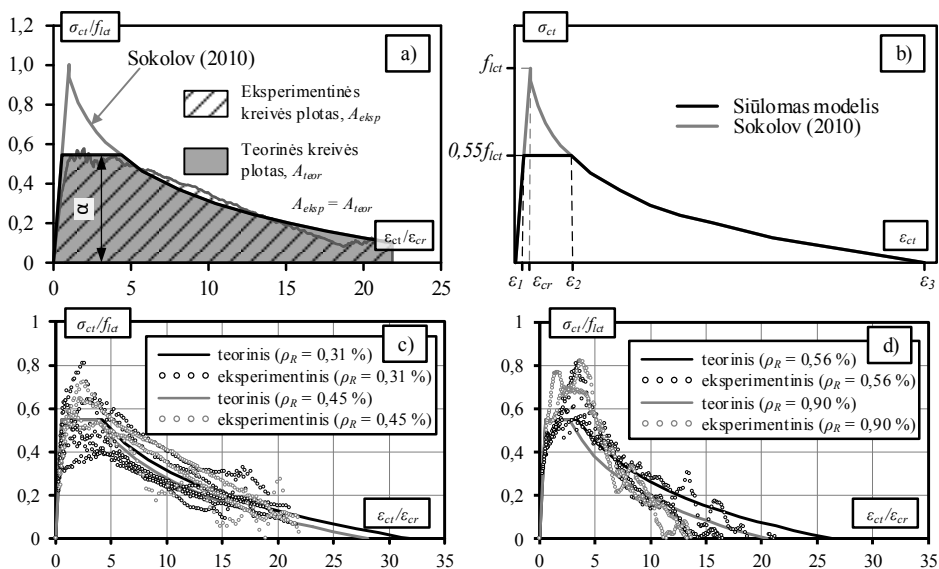
Remiantis gautais duomenimis, šiuose tyrimuose siūloma Sokolov (2010) modelio modifikacija, kuri apima maksimalių pleišėjimo įtempių sumažinimą. Modelio išvedimo principinis pavyzdys pateiktas 4.5 a paveiksle. Kiekvienai eksperimentinei įtempių ir deformacijų diagramai apskaičiuotas ja apribotas plotas A_{eksp} . Analogiškas plotas A_{teor} apskaičiuojamas Sokolov (2010) teoriniam modeliui. Siekiant išlaikyti vienodą eksperimentinį (A_{eksp}) ir teorinį (A_{teor}) plotus bei darant prielaidą, kad eksperimentinių kreivių krintančioji dalis atitinka Sokolov (2010) pasiūlytą kreivę, eksperimentinė įtempių ir deformacijų diagrama modifikuojama sumažinant jo plotą didžiausių tempimo įtempių zonoje. Paprastumo sumetimais modifikuotame modelyje LB elementų plyšių formavimosi stadija apibūdinama horizontaliaja linija, kurios padėtį tempiamojo stiprio atžvilgiu nusakо koeficientas α (4.5 a pav.). Šį algoritmą pritaikius visoms eksperimentinėms įtempių ir deformacijų diagramoms gauta vidutinė korekcijos koeficiento vertė sudarė $\alpha = 0,55$. Taikant šį koeficientą, eksperimentinių ir teorinių kreivių palyginamoje analizėje gautas mažesnis nei 1 % A_{eksp} ir A_{teor} plotų nesutapimas, atspindintis priimtų prielaidų adekvatumą.

Pasiūlytas modifikuotas fizikinis modelis pateiktas 4.5 b paveiksle. Modelis aproksimuotas trijų kreivių diagrama. Kylančioji kreivės dalis aprašo tamprią betono elgseną iki pleišėjimo. Horizontalioji ir krintančioji dalys apibūdina plyšių

formavimosi bei vystymosi stadijas. Didžiausieji tempimo įtempiai imti $\sigma_{ct} = 0,55f_{lct}$, čia f_{lct} – pagal EC2 normas apskaičiuotas lengvojo betono vidutinis tempiamasis stipris. Šiuos įtempius atitinkanti deformacija nustatoma pagal tokią formulę:

$$\varepsilon_1 = 0,55\varepsilon_{cr}, \quad (4.1)$$

čia $\varepsilon_{cr} = f_{lct} / E_{lcm}$ – teorinė tempiamąjį stiprį atitinkanti deformacija; E_{lcm} – betono tamprumo modulis, apskaičiuojamas pagal EC2 normas priklausomai nuo betono gniuždomojo stiprio.



4.5 pav. Modelio išvedimo principinė schema (a); siūlomas tempiamosios zonos betono modelis armuoto lengvojo betono elementams (b); eksperimentinių sijų normalizuotų įtempių ir deformacijų kreivių palyginimas su siūlomuoju modeliu (c ir d)

Fig. 4.5. Principle scheme of model deriving (a); proposed tension-stiffening model for reinforced lightweight concrete elements (b); normalised stress-strain diagrams comparison of experimental beams with the proposed model (c and d)

Diagramos krintančiosios dalies forma aprašoma pagal šią priklausomybę:

$$\sigma_{ct} = f_{lct} \left(1 - 0,27 \ln \left(\frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_{cr}} \right) - 0,21\rho_R \right), \quad (4.2)$$

čia σ_{ct} ir ε_{ct} – atitinkamai tempiamojo betono įtempiai ir deformacijos; ρ_R – armavimo procentas.

Deformacija, atitinkanti horizontaliosios dalies pabaigą, apskaičiuojama pagal priklausomybę, išvestą (4.2) išraiškoje taikant tempiamojo betono įtempių vertę $\sigma_{ct} = 0,55f_{ct}$:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_{cr} e^{1,667-0,78\rho_R}. \quad (4.3)$$

Krintančiosios dalies ilgis apibūdinamas deformacija ε_3 . Ji atitinka ribą, kai tempiamasis betonas nebeperima įtempių. Ši deformacija apskaičiuojama pagal tokią formulę:

$$\varepsilon_3 = \varepsilon_{cr} e^{3,7-0,78\rho_R}. \quad (4.4)$$

Eksperimentinių ir teorinių įtempių bei deformacijų diagramų sugretinimas pateiktas 4.5 c ir d paveiksluose. Kai kurie eksperimentinių ir teorinių didžiausiųjų tempimo įtempių nesutapimai gali būti paaiškinami betono pleišėjimo stochastine prigimtimi. Momentų ir kreivių diagramų charakteriui didelę įtaką turi ir eksperimentinėse sijų grynojo lenkimo zonoje skirtingas susiformavusių plyšių skaičius (3.5 pav.). Dėl šios priežasties tų pačių geometrinių ir fizinių parametrų sijoms gaunamos skirtingos tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybės. Šie aspektai atspindi fizikinio modeliavimo galimus neapibrėžtumus. Toliau įvertintas siūlomo tempiamojo LB fizikinis modelio tikslumas, jį pritaikant literatūroje paskelbtų eksperimentinių sijų deformacijų skaitinėje analizėje baigtinių elementų programa ATENA.

4.3. Pasiūlyto fizikinio modelio adekvatumo įvertinimas

Siūlomojo tempiamojo lengvojo betono modelio adekvatumas patikrintas naudojant literatūroje paskelbtus armuotų LB elementų eksperimentinius duomenis. Duomenų imtį sudarė 51-o LB lenkiamojo elemento duomenys, gauti iš penkių skirtingų bandymų programų. Tyrimuose panaudoti Carmo *et al.* (2013), Sin *et al.* (2011), Bernardo *et al.* (2016), Wu *et al.* (2011) ir Vakhshouri (2017) eksperimentiniai duomenys. Siūlomo modelio universalumui įvertinti papildomai atliktas dviejų šaltinyje (Bocca ir Rossetti 1978) pateiktų ekscentriškai tempiamų gelžbetoninių elementų eksperimentinių ir teorinių rezultatų sugretinimas. Pagrindinės lenkiamųjų elementų charakteristikos pateiktos 4.1 lentelėje, ekscentriškai tempiamųjų – 4.2 lentelėje.

Eksperimentinių sijų armavimo procentas svyravo nuo 0,33 % iki 2,82 %, tankis nuo 1651 kg/m³ iki 2000 kg/m³, betono gniuždomasis stipris – nuo 20 MPa iki 70,1 MPa. Skaitinei analizei reikalingi trūkstami duomenys (pvz., betono tempiamasis stipris, susitraukimo deformacijos ir pan.) buvo apskaičiuoti taikant EC2 normose pateiktas priklausomybes.

4.1 lentelė. Eksperimentinių sijų pagrindinės charakteristikos**Table 4.1.** Main characteristics of experimental beams

Eil. Nr.	Šaltinis	Elementų skaičius	L_0 , m	h , mm	b , mm	ρ_R , %	ρ , kg/m ³	f_{icm} , MPa
1	Carmo <i>et al.</i> (2013)	13	2,80	270	120	0,53–2,82	1870–1900	37,0–70,0
2	Sin <i>et al.</i> (2011)	18	2,80	300	150	0,69–2,27	1700–2000	25,1–70,1
3	Bernardo <i>et al.</i> (2016)	14	2,40	300	150	0,38–2,69	1651–1953	20,0–55,0
4	Wu <i>et al.</i> (2011)	3	4,00	400	250	0,33–1,310	1900	34,2
5	Vakhshouri (2017)	3	3,50	161	400	0,83	2000	31,0
	Iš viso:	51	2,40–4,00	161–400	120–400	0,33–2,82	1651–2000	20,0–70,1

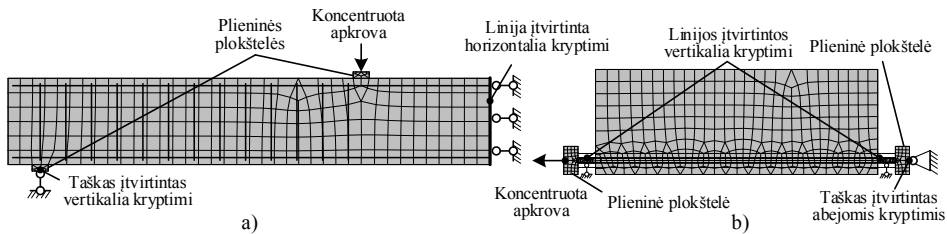
4.2 lentelė. Ekscentriškai tempiamų elementų pagrindinės charakteristikos**Table 4.2.** Main characteristics of eccentrically loaded ties

Eil. Nr.	Šaltinis	Žymuo	L , mm	h , mm	b , mm	ρ_R , %	ρ , kg/m ³	f_{icm} , MPa
1	Bocca ir Rossetti (1978)	Ø12B	800	300	80	0,47	1630	35,6
2		Ø8B				0,21		

Skaitinė analizė atlikta taikant netiesinio skaičiavimo baigtinių elementų programą ATENA. Sudaryti eksperimentinių elementų plokštūminiai baigtinių elementų modeliai, kartu įvertinant armatūros ir gniuždomojo bei tempiamojo betono elgsenos ypatumus. Armatūros elgsena aprašyta plieno takumo ribą ir tampumo modulį atitinkančia idealizuota tampriai plastine diagrama. Gniuždomo betono elgsenai naudota tiesinė įtempių ir deformacijų diagrama. Tempiamojo betono elgsenai modeliuoti taikytas siūlomas fizikinis modelis (4.5 b pav.). Supleišėjusio tempiamojo betono elgsena programoje ATENA įvertinta remiantis vidutinių plyšių modelio ir irimo mechanikos principais.

Netiesinės analizės rezultatai labai priklauso nuo pasirinkto baigtinių elementų dydžio skaitiniame modelyje. Anksčiau atlikti tyrimai (Gribniak *et al.* 2010, 2013a,) parodė, kad programa ATENA gaunamų skaitinės analizės rezultatų tikslumas yra pakankamas naudojant 6–8 baigtinius elementus per bandinio aukštį. Remiantis Gribniak *et al.* (2010) rekomendacijomis, baigtinių elementų dydis buvo normalizuotas, imant 20 mm baigtinio elemento charakteristinį ilgį. Tokia normalizacija leidžia išvengti gaunamų rezultatų priklausomybės nuo baigtinio elemento dydžio. Remiantis pirmiau minėtais aspektais, sijų baigtinių elementų modeliuose imti 6 baigtiniai elementai per aukštį, ekscentriškai

tempiamų elementų modeliuose – 10 baigtinių elementų. Betonui modeliuoti panaudoti izoparametriniai 8 laisvės laipsnių keturkampiai baigtiniai elementai su keturiais integracijos taškais. Sijų armatūra modeliuota strypiniais elementais, ekscentriškai tempiamų elementų armatūrai modeliuoti taikyti tūriniai makroelementai. Baigtinių elementų modelių pavyzdžiai patiekti 4.6 paveiksle.

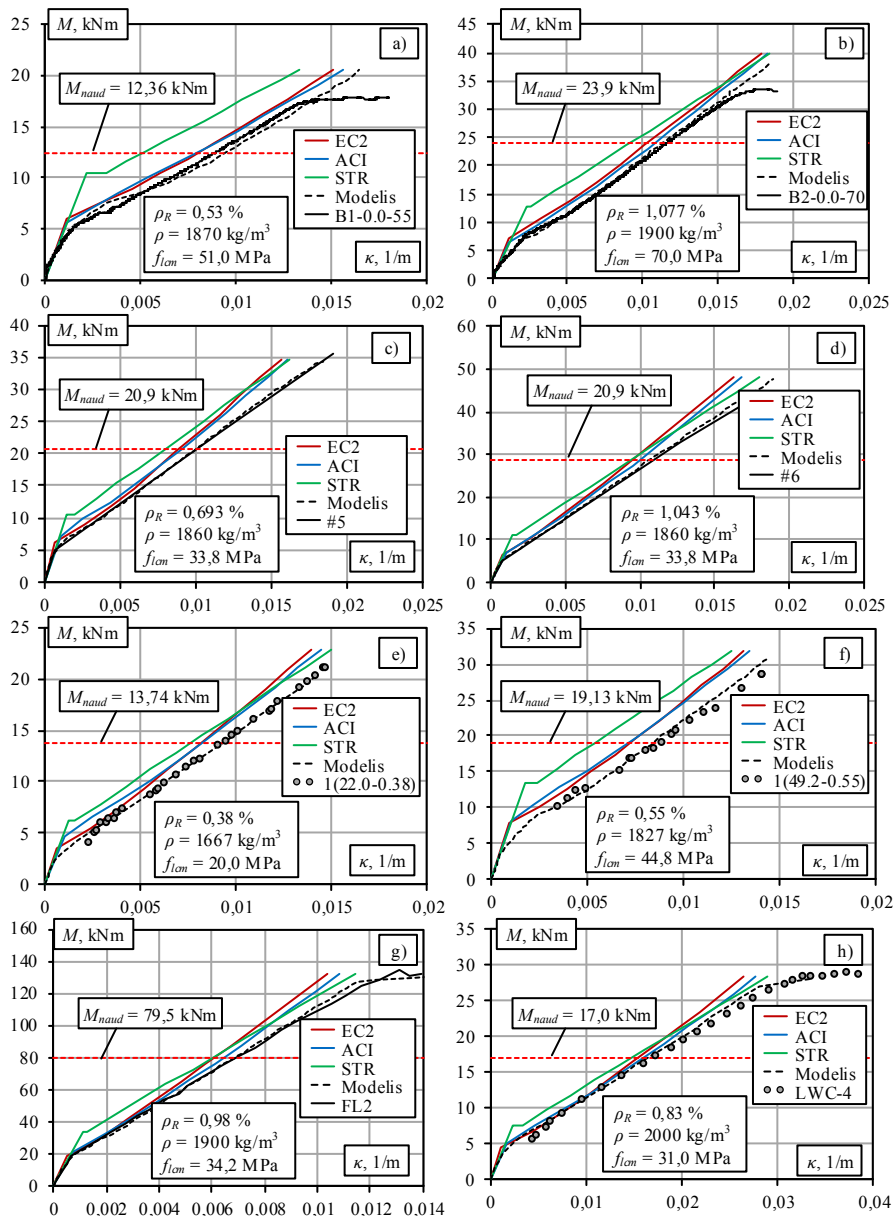


4.6 pav. ATENA baigtinių elementų modeliai: a) sija B1-0.0-55 (Carmo *et al.* 2013);
b) ekscentriškai tempiamas elementas Ø12B (Bocca ir Rossetti 1978)
Fig. 4.6. ATENA finite element models: a) Beam B1-0.0-55 (Carmo *et al.* 2013);
b) eccentrically loaded tie Ø12B (Bocca and Rossetti 1978)

Būtina pabrėžti, kad atliekant skaitinę analizę buvo įvertintos susitraukimo deformacijos stadijoje iki apkrovimo. Susitraukimas buvo modeliuojamas kaip tam tikro dydžio deformacija, veikianti betono makroelementus (Gribniak *et al.* 2013a).

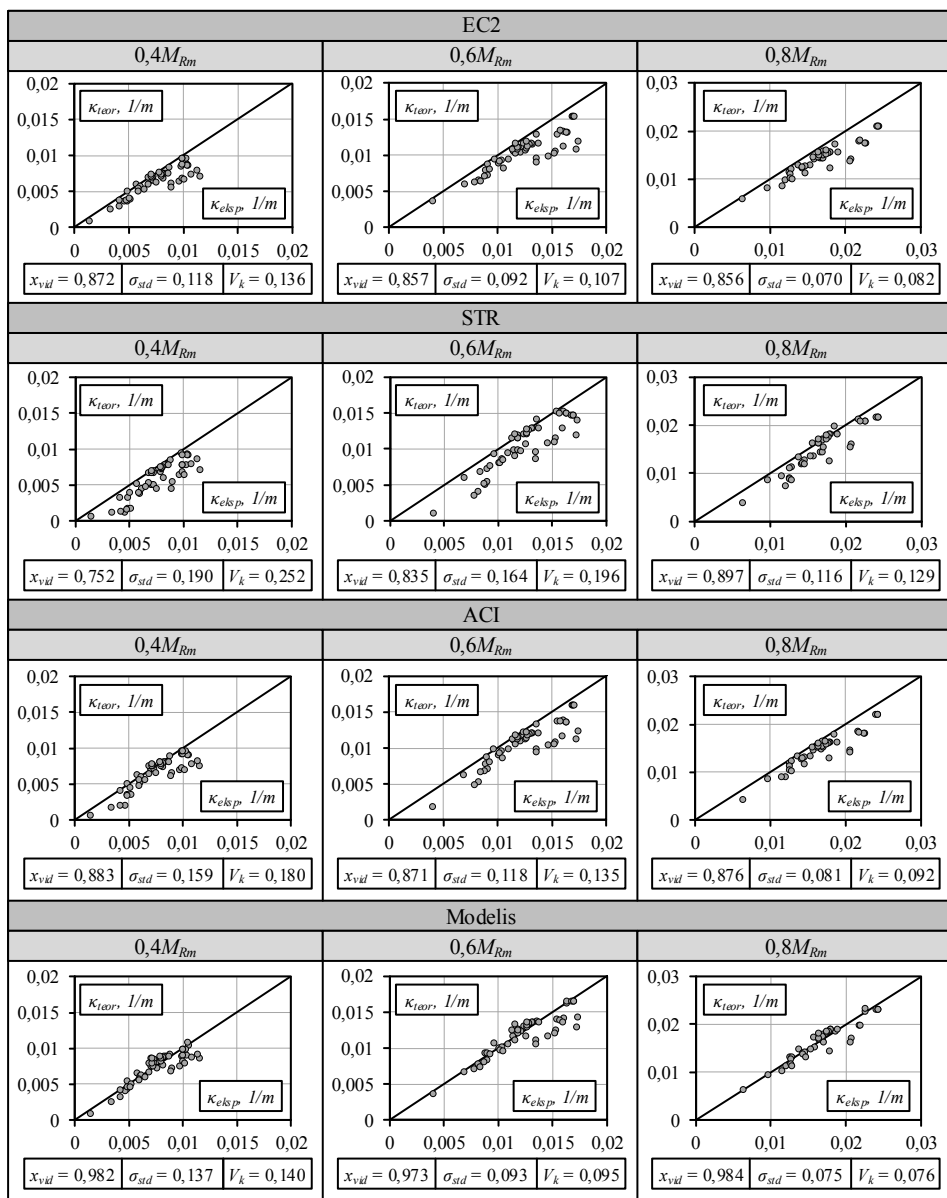
Pasirinktų aštuonių sijų modeliavimo rezultatai pateikti 4.7 paveiksle kartu su eksperimentinėmis momentų ir kreivių diagramomis bei teorinėmis kreivėmis, apskaičiuotomis taikant EC2, STR ir ACI projektavimo normų metodus. Minėtame paveiksle ρ_R atitinka armavimo procentą, ρ – betono tankį, f_{icm} – gniuždomąjį stiprį. Rezultatai palyginti naudojimo apkrovos lygmenyje $M_{naud} = 0,6M_{Rm}$, čia M_{Rm} – teorinis atlaikomas lenkimo momentas, apskaičiuotas pagal EC2 (4.7 pav. atidėta raudona brūkšninė linija).

Eksperimentinių duomenų imčiai skaitiniu bei inžineriniais metodais gautų teorinių ir eksperimentinių rezultatų sugretinimas pateiktas 4.8 paveiksle. Palyginimas atliktas skirtinguose apkrovimo lygmenyse: $0,4M_{Rm}$, $0,6M_{Rm}$ (M_{naud}) ir $0,8M_{Rm}$. Šio paveikslo kiekvieno grafiko apačioje pateikiama santykinio kreivio ($\kappa_{teor}/\kappa_{eksp}$) vidurkio reikšmė (x_{vid}), standartinis nuokrypis (σ_{std}) ir variacijos koeficientas (V_k). Iš pateiktų rezultatų matyti, kad EC2 normomis $0,4M_{Rm}$, $0,6M_{Rm}$ ir $0,8M_{Rm}$ apkrovos lygmenyse gaunamos atitinkamai 12,8 %, 14,3 % ir 14,4 % vidutinės paklaidos. Taigi paklaidos didėja nedaug, didėjant apkrovos lygmeniui.



4.7 pav. Teorinių ir eksperimentinių momentų ir kreivių diagramų sugretinimas: a) ir b) Carmo et al. (2013); c) ir d) Sin et al. (2011); e) ir f) Bernardo et al. (2016); g) Wu et al. (2011); h) Vakhshouri (2017)

Fig. 4.7. Comparison of theoretical and experimental moment-curvature diagrams: a) and b) Carmo et al. (2013); c) and d) Sin et al. (2011); e) and f) Bernardo et al. (2016); g) Wu et al. (2011); h) Vakhshouri (2017)



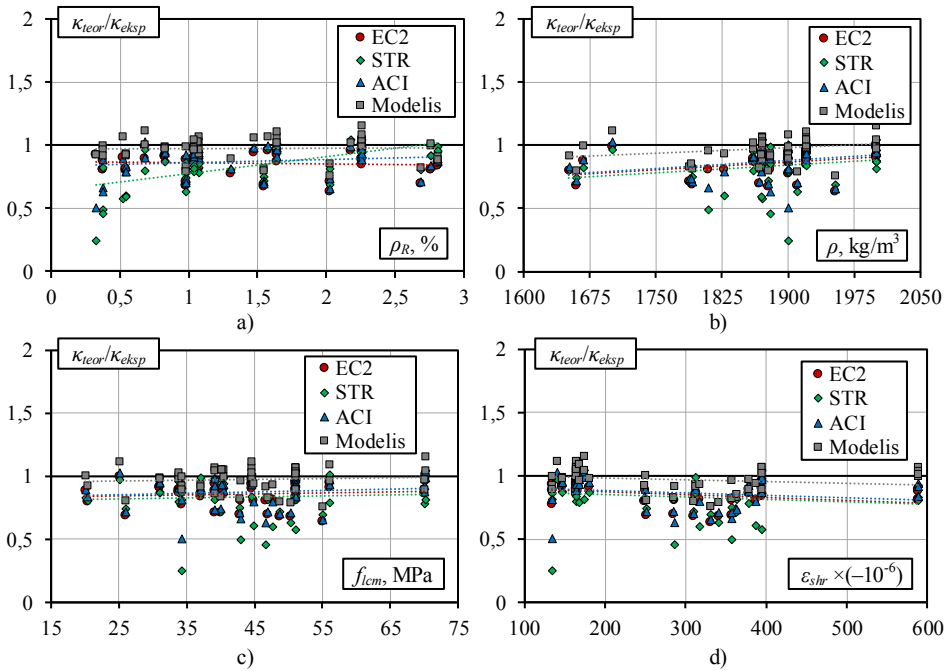
4.8 pav. Eksperimentinių ir teorinių kreivių palyginimas skirtinguose apkrovos lygmenyse

Fig. 4.8. Comparison of experimental and theoretical curvatures at different load levels

STR normų metodu minėtuose lygmenyse gaunamos atitinkamai 24,8 %, 16,5 % ir 10,3 % vidutinės paklaidos. Šiuo metodu gaunamos EC2 metodikai priešingos tendencijos: didėjant apkrovos lygmeniui, STR metodu prognozuojamos paklaidos mažėja. ACI metodu atitinkamuose apkrovos lygmenyse gaunamos 11,7 %, 12,9 % ir 12,4 % vidutinės paklaidos. Skaitiniu modeliu gaunami tiksliausi rezultatai: esant $0,4M_{Rm}$, $0,6M_{Rm}$ ir $0,8M_{Rm}$ apkrovos lygiams vidutinės paklaidos sudaro atitinkamai 1,8 %, 2,7 % ir 1,6 %. Kitas svarbus aspektas tas, kad visais inžineriniais metodais gaunamos per mažos kreivių vertės, lyginant su eksperimentinėmis. Tos pačios tendencijos gautos ir 3 skyriuje atliktoje lyginamojoje analizėje. Sukurtas modelis ateityje gali būti taikomas kaip patikima priemonė projektavimo normų metodams tobulinti.

Armavimo procento ρ_R , betono tankio ρ , betono gniuždomojo stiprio f_{cm} ir susitraukimo deformacijų ε_{shr} įtaka teorinių rezultatų sklaidai pateikta 4.9 paveiksle. Rezultatai atitinka naudojimo apkrovos lygmenį $M_{naud} = 0,6M_{Rm}$. Iš 4.9 a paveikslo matyti, kad EC2 ir ACI normų bei skaitinio modelio tikslumas mažai priklauso nuo armavimo procento. STR normų metodu gaunamų rezultatų tikslumas blogėja mažėjant armavimo procentui. Nagrinėjant skaičiavimo rezultatų tikslumo priklausomybes nuo tankio ρ (4.9 b pav.), pastebima tendencija, kad visais metodais rezultatų tikslumas mažėja, mažėjant elementų tankiui. Tankio įtaka nagrinėjamų metodų tikslumui yra apytikriai vienoda. 4.9 c paveiksle pateikti rezultatai rodo, kad visų metodų tikslumas nepriklauso nuo gniuždomojo betono stiprio. Betono susitraukimo deformacijų ε_{shr} įtaka santykiniams kreiviams atskleista 4.9 d paveiksle. Pastebima nedidelė visų projektavimo normų priklausomybė nuo susitraukimo deformacijų: skaičiavimo paklaidos didėja, didėjant susitraukimo deformacijoms. Skaitiniu modeliu gaunami rezultatai yra mažiau jautrūs susitraukimo deformacijų reikšmėms.

Ekscentriškai tempiamų (Bocca ir Rossetti 1978) modeliavimo rezultatai pateikti 4.10 paveiksle, kuris atspindi gerą teorinių ir eksperimentinių rezultatų sutapimą. Pateiktuose paveiksluose raudona punktyrine linija pažymėtas eksploatacinės apkrovos lygmuo, kuris atitinka 300 MPa įtempius armatūroje sukeliančią apkrovą. Elementui, kurio armavimo procentas 0,47 % (4.10 a pav.), prognozavimo paklaida, esant naudojimo apkrovai, lygi 1,8 %. Mažai armuotam elementui ($\rho_R = 0,21$ %, 4.10 b pav.) gaunama paklaida siekia 25 %. Atsižvelgiant į šių elementų elgsenos ypatumus ir stochastinį pleišėjimo pobūdį skaitiniu modeliavimu gauti geri rezultatai. Gauti rezultatai atskleidžia siūlomo modelio universalumą ir galimybes jį taikyti ne tik lenkiamųjų elementų analizei.



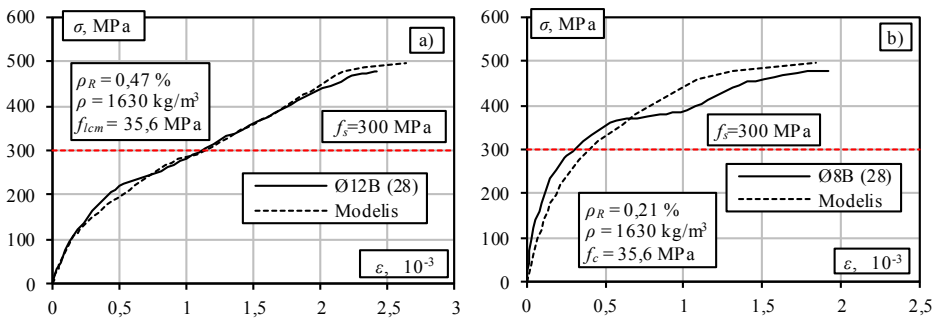
4.9 pav. Skirtingais metodais apskaičiuotų santykinių kreivių priklausomybės nuo:

a) armavimo procento ρ_R ; b) tankio ρ ; c) gniuždomojo stiprio f_{icm} ;

d) susitraukimo deformacijos ε_{shr}

Fig. 4.9. Relative curvatures estimate by different methods vs: a) reinforcement ratio ρ_R ;

b) density ρ ; c) compressive strength f_{icm} ; d) deformation of shrinkage ε_{shr}



4.10 pav. Eksperimentinių (Bocca ir Rossetti 1978) ir skaitinių ekscentriškai tempiamų elementų rezultatų sugretinimas

Fig. 4.10. Comparison of experimental (Bocca and Rossetti 1978) and numerical results of eccentrically loaded ties

4.4. Natūralaus dydžio lengvojo armuoto betono lenkiamųjų elementų skaitinis modeliavimas

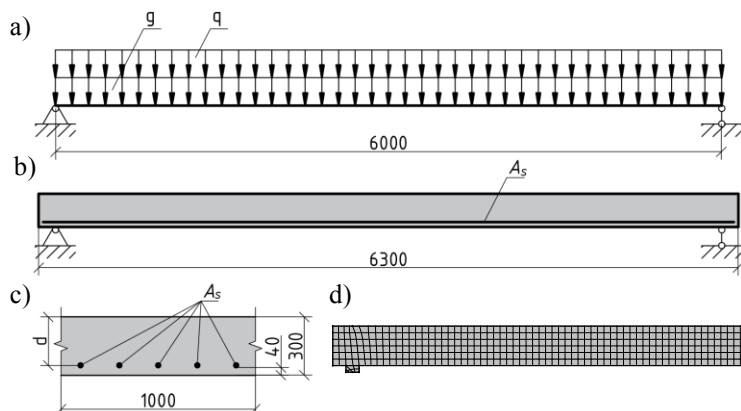
Šiame poskyryje atlikta natūralaus dydžio plokštės ir sijos lyginamoji skaitinė deformacijų analizė. Taikant pasiūlytą fizikinį modelį ir baigtinių elementų programą ATENA, palyginta realaus dydžio lengvojo ir tradicinio armuoto betono konstrukcinių elementų elgsena, veikiant nuolatinės ir kintamosios apkrovos trumpalaikiams poveikiams. Atskleista, kad priklausomai nuo saugos ir tinkamumo ribinio būvio reikalavimų lengvojo armuoto betono elementuose gali būti sumažintas išilginės armatūros kiekis, lyginant su tokių pačių parametrų tradiciniais gelžbetoniniais elementais.

4.4.1. Elementų duomenys ir modeliavimo metodika

Tyrimų objektu priimti pagal EC2 normų reikalavimus suprojektuoti laisvai atremti tradicinio ir lengvojo betono konstrukciniai elementai: plokštė ir sija. Plokštė projektuojama dviejų skirtingų lygių charakteringosioms kintamosioms apkrovoms, kurios reprezentuoja EC1 normose reglamentuotas pėsčiųjų minios apkrovos mažiausią ir didžiausią vertes – 2,5 kPa ir 5,0 kPa. Plokštės skaičiuojamasis ilgis – 6 m, plotis – 1 m. Plokštės aukštis parinktas atsižvelgiant į veikiančią kintamąją apkrovą ir EC2 normose nustatytas įlinkio ribojimo rekomendacijas ir imtas 0,3 m. Apsauginis betono sluoksnis – 40 mm. Tradicinio betono tankis – 2300 kg/m³, o lengvojo – 1800 kg/m³. Charakteringoji nuolatinė apkrova apskaičiuota įvertinus plokštės savąjį svorį ir pakloto apkrovą (10,6 kPa ir 9,1 kPa atitinkamai normaliajam ir lengvajam betonui). Tradicinio gelžbetonio elementams imtas C30/37 klasės betonas, o lengvojo – tą patį gniuždomąjį stiprų atitinkantis LC30/33 klasės lengvasis betonas. Abiem elementams armuoti naudota išilginė S500 klasės plieninė armatūra. Skersinis armavimas nenumatytas. Plokštės skaičiuotinė schema ir pagrindiniai parametrai pateikti 4.11 a–c paveiksle.

Nustatytiems pradiniais parametrams atliktas tradicinio ir lengvojo betono plokščių projektavimas užtikrinant mechaninį atsparumą normaliniame ir įstrižajame pjūviuose. Atsižvelgiant į saugos ribinio būvio skaičiavimo rezultatus, 2,5 kPa ir 5,0 kPa kintamosiomis apkrovomis veikiamos tradicinio gelžbetonio plokštės armuojamos atitinkamai 5 Ø14 mm ($\rho_R = 0,3\%$) ir 5×Ø16 mm ($\rho_R = 0,4\%$) skersmens strypais. Siekiant palyginti lengvojo ir tradicinio betono elementų elgseną, toks pats armavimo intensyvumas imtas ir LB plokštėms. Norint atskleisti lengvojo betono taikymo privalumus ir atsižvelgiant į sumažėjusią nuolatinę apkrovą, papildomai nagrinėta LB plokščių elgsena armavimo intensyvumą sumažinus iki 6 Ø12 mm ($\rho_R = 0,27\%$) ir 8×Ø12 mm ($\rho_R = 0,36\%$). Betono susitraukimo deformacijos iki apkrovimo apskaičiuotos pagal EC2 normų

metodiką ir normaliajam bei lengvajam betonui sudarė atitinkamai $-1 \cdot 10^{-4}$ ir $-1,14 \cdot 10^{-4}$. Plokščių skaitinis modeliavimas atliktas baigtinių elementų programa ATENA, taikant 4.3 poskyryje pateiktus principus. Tradicinio gelžbetonio plokštės taikytas Sokolov (2010) fizikinis tempiamojo armuoto betono modelis, o LB plokštės – 4.2 poskyryje pasiūlyta modelio modifikacija. Plokštės baigtinių elementų modelis pateiktas 4.11 d paveiksle.

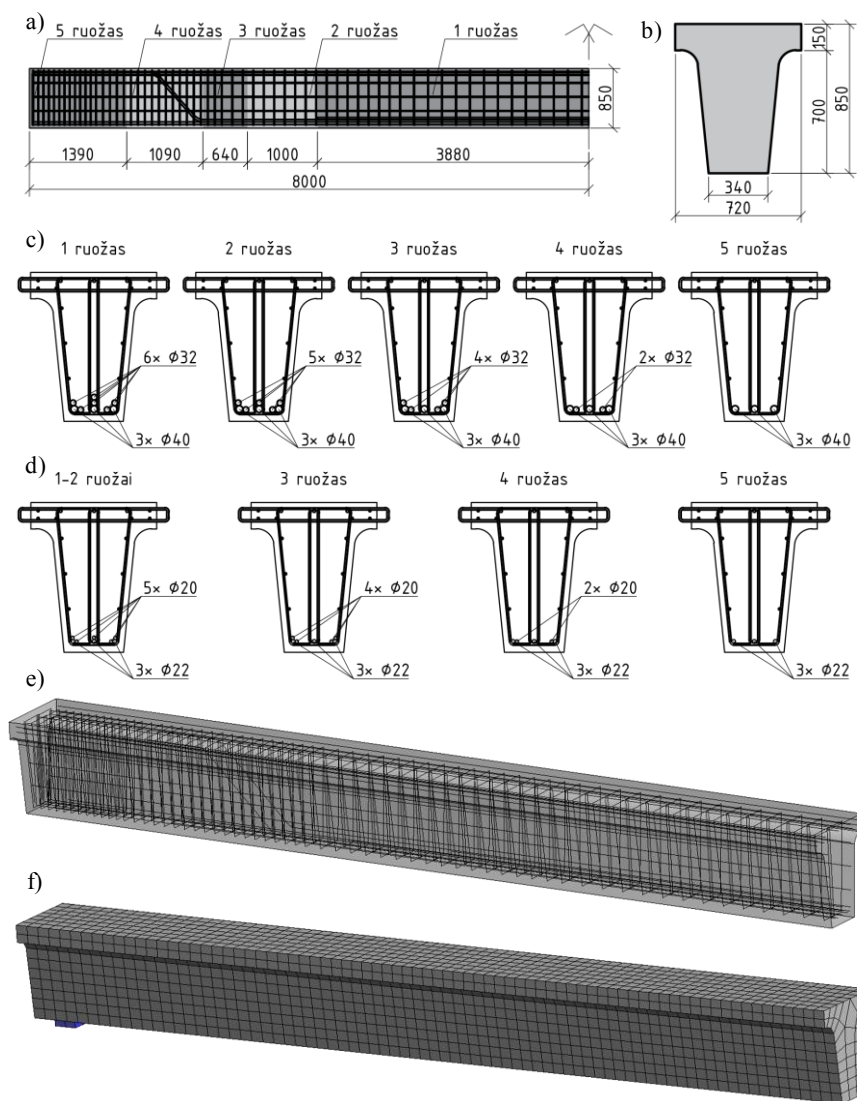


4.11 pav. Projektuojama perdangos plokštė: a) skaičiuojamoji schema; b) perdangos išilginis vaizdas; c) perdangos skersinis pjūvis; d) baigtinių elementų modelis

Fig. 4.11. Designed slab: a) static scheme; b) side view of the slab; c) cross-section of the slab; d) finite element model

Panašiais principais remiasi ir analizėje naudotos tilto perdangos sijos modeliavimas. Analizėje imta automobilių ir pėsčiųjų tiltų perdangoms naudojama tipinė 16 m ilgio, 15,4 m skaičiuojamojo tarpatramio tėjinio skerspjūvio sija. Sijos išilginis ir skersinis pjūviai pateikti 4.12 a ir b paveiksle. Atsižvelgiant į išilginės tempiamosios armatūros kiekį ir išdėstymą, sija suskirstyta į penkis atskirus ruožus. Kiekvieno ruožo armavimas automobilių ir pėsčiųjų tiltų sijoms pateiktas 4.12 c ir d pav.

Automobilių tilto perdangos sija yra pagaminta iš C35/45 klasės tradicinio betono ir armuota S500 klasės armatūros strypais. Sija suprojektuota atlaikyti $M_{Rd} = 2140$ kNm skaičiuotinį lenkimo momentą. Charakteristinis lenkimo momentas nuo nuolatinės savojo sijos svorio ir tilto pakloto apkrovos sudarė $M_{gk} = 476$ kNm. Sijos armavimo procentas viduriniame ruože – 2,33 %. Atitinkamų geometrinių parametrų ir armavimo lengvojo betono sijoms imtas LC35/38 klasės betonai, kurio tankis $\rho = 1900$ kg/m³. Dėl sumažėjusio savojo svorio charakteristinis lenkimo momentas nuo nuolatinės apkrovos šioms sijoms sumažėja iki $M_{gk} = 407$ kNm.



4.12 pav. Analizėje naudota tilto perdangos sija: a) sijos išilginis pjūvis ir sudalijimas į ruožus; b) sijos skersinis pjūvis; c) automobilių tilto sijos armavimas skirtinguose ruožuose; d) pėsčiųjų tilto sijos armavimas skirtinguose ruožuose; e) sijos kompiuterinis modelis; f) sijos baigtinių elementų modelis

Fig. 4.12. Bridge girder used in the analysis: a) longitudinal cross section of the girder and division into zones; b) cross section of the girder; c) reinforcing details of roadway bridge girder in different zones; d) reinforcing details of footbridge girder in different zones; e) computer model of the girder; f) finite element model of the girder

Pėsčiųjų tilto sijos suprojektuotos 5 kPa kintamajai apkrovai. Tradicinio gelžbetonio sijoms naudotas C30/37 klasės betonas ir S500 klasės armatūra. Sijų išilginis armavimas skirtinguose ruožuose (4.12 d pav.) parinktas užtikrinant laikomąją galią normaliniame pjūvyje. Lengvojo betono sijoms naudotas LC30/33 klasės lengvasis betonas, kurio tankis $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$. Dėl mažesnio sijos savjo svorio nuolatinės apkrovos sukiamas charakteristinis lenkimo momentas sumažėjo nuo $M_{gk} = 459 \text{ kNm}$ iki $M_{gk} = 389 \text{ kNm}$. Kaip ir perdangos plokščių analizėje, siekiant palyginti lengvojo ir tradicinio betono elementų elgseną, pirmajame etape palyginta vienodo armavimo intensyvumo tradicinio betono ir LB sijų elgsena. Antrajame etape, atsižvelgiant į sumažėjusią nuolatinę apkrovą, papildomai nagrinėta LB sijų elgsena vidurinėje zonoje (4.12 d pav. 1–2 zona), sumažinus armavimo intensyvumą nuo 0,72 % iki 0,64 %. Tokiu būdu antrajame etape nagrinėtos sijos išilginės armatūros skersmuo iš $\varnothing 20 \text{ mm}$ pakeistas į $\varnothing 18 \text{ mm}$.

Skaitinėje sijų analizėje stadijoje įvertinta susitraukimo deformacijų įtaka iki apkrovimo. Šių deformacijų vertės apskaičiuotos pagal EC2 projektavimo normas. Gautos automobilių tilto sijų susitraukimo deformacijų vertės yra tokios: naudojant tradicinį betoną $-5,8 \cdot 10^{-5}$, naudojant lengvąjį betoną $-6,2 \cdot 10^{-5}$; pėsčiųjų tilto sijų susitraukimo deformacijų vertės tokios: naudojant tradicinį betoną $-5,4 \cdot 10^{-5}$, naudojant lengvąjį betoną $-5,8 \cdot 10^{-5}$.

Sijoms modeliuoti naudotas baigtinių elementų programoje ATENA integruotas GID programos modulis. Buvo modeliuota taikant trimačius izoparametrinius 24 laisvės laipsnių baigtinius elementus, turinčius 8 integracijos taškus. Kiti modeliavimo aspektai nesiskyrė nuo imtų atliekant plokščių skaitinį modeliavimą. Sumodeliuotos sijos kompiuterinis vaizdas pateiktas 4.12 e paveiksle, o sudalijimas į baigtinius elementus – 4.12 f paveiksle.

Būtina pažymėti, kad dėl neapibrėžtumų, susijusių su lengvojo betono atsparumo šlyčiai prognozavimu, skyriuje pateiktoje analizėje nevertintas pastarųjų elementų atsparumas įstrižajame pjūvyje. Daryta prielaida, kad tradicinio ir lengvojo betono elementų atsparumas yra vienodas. Armuoto lengvojo betono elementų pakankamą atsparumą įstrižajame pjūvyje patvirtino modeliavimo rezultatai: visi elementai suiro normaliniame pjūvyje dėl lenkimo momento poveikio. Analizėje taip pat neatsižvelgta į ilgalaikius betono valkšnumo ir susitraukimo efektus, t. y. nevertintas nuolatinės ilgalaikės apkrovos poveikio sukiamas elementų standumo mažėjimas laikui einant. Siekiant nuodugniai įvertinti minėtus efektus, ateityje būtina atlikti papildomus tyrimus.

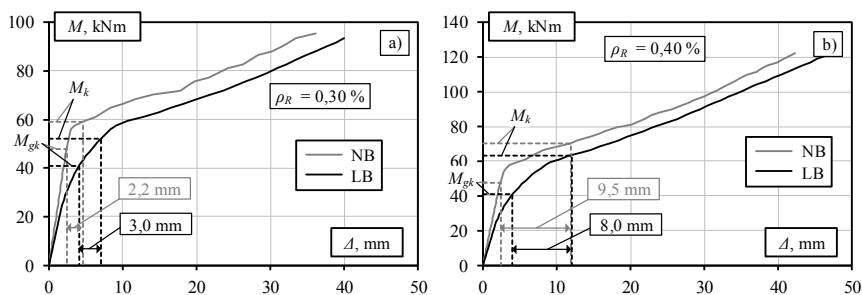
4.4.2. Modeliavimo rezultatai

Vienodų parametrų tradicinio ir lengvojo betono perdangos plokščių modeliavimo rezultatai pateikti 4.13 paveiksle. Rezultatai palyginti suminio charakteringojo lenkimo momento M_k lygmenyje. Tiltų projektavimo praktikoje nuolatiniai

apkrovų sukelti įlinkiai, įskaitant ir ilgalaikius pokyčius, dažniausiai kompensuojami pradinio konstrukcijų išlinkiu. Konstrukcijų standumas dažniausiai ribojamas atsižvelgiant į kintamosios charakteristinės eismo apkrovos sukeltus įlinkius, kuriuos savo ruožtu riboja projektavimo normose reglamentuojamos santykinų įlinkių ribinės vertės. Dėl mažesnio standumo lengvojo armuoto betono įlinkių ribojimas gali tapti lemiamu šių konstrukcijų projektavimo veiksmu.

Iš 4.13 paveikslo matyti, kad 0,30 % armavimo procento elementui LB plokštės įlinkis nuo kintamosios apkrovos ($\Delta_{qk} = 3,0$ mm) yra šiek tiek didesnis nei NB plokštės ($\Delta_{qk} = 2,2$ mm). Tačiau abiejų elementų įlinkio reikšmės yra nedidelės. Plokštėms, kurių armavimo procentas 0,40 % (4.13 b pav.), gautos kiek kitokios tendencijos. NB plokštės įlinkis nuo kintamosios apkrovos gaunamas didesnis nei LB plokštei – atitinkamai 9,5 mm ir 8,0 mm. Šiuos skirtumus galima paaiškinti mažesniu LB plokščių suminiu lenkimo momentu, kurį lemia mažesnė nuolatinė apkrova. Detalūs skaičiavimo rezultatai apibendrinti 4.3 lentelėje.

Dėl mažesnio LB plokščių svorio galima sumažinti išilginės armatūros kiekį, lyginant su tokių pat parametrų NB plokštėmis. Kita vertus, šiuo atveju sumažėjusio elementų standumo gali tekti atsižvelgti į įlinkių apribojimus. Šios vertės reglamentuotos įvairiose projektavimo normose ir priklauso nuo konstrukcijų pasirties.



4.13 pav. Perdangos plokščių modeliavimo rezultatai

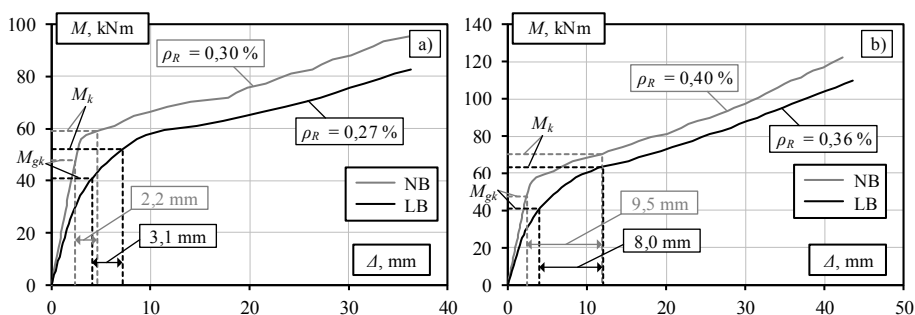
Fig. 4.13. Modelling results of slabs

4.3 lentelė. Projektuojamų plokščių parametrai ir analizės rezultatai

Table 4.3. Parameters and analysis results of designed slabs

Eil. Nr.	Betonas	ρ_R , %	Armatūra	A_s , $\times 10^{-4}$ m ²	d, m	M_{gs} , kNm	M_k , kNm	M_{gs}/M_k	M_{eds} , kNm	M_{Rms} , kNm	Δ_{qk} , mm
1.	NB	0,30	5×Ø14	7,70	0,253	47,7	59,0	0,81	79,6	95,1	2,2
2.	LB					41,0	52,3	0,78	70,5		3,0
3.	NB	0,40	5×Ø16	10,05	0,252	47,7	70,2	0,68	94,8	122,8	9,5
4.	LB					41,0	63,5	0,65	85,7		8,0
5.	LB	0,27	6×Ø12	6,79	0,254	41,0	52,3	0,78	70,5	84,4	3,1
6.	LB	0,36	8×Ø12	9,05	0,254	41,0	63,5	0,65	85,7	111,7	8,0

Sumažinto armavimo LB plokščių analizės rezultatai pateikti 4.14 pav. Iš pateiktų rezultatų matyti, kad 0,30 % armavimo procento plokštei įlinkio vertė padidėjo nedaug: vietoje 3,0 mm gauta 3,1 mm įlinkio vertė, kuri yra praktiniu požiūriu priimtina. Taigi projektuojant 2,5 kPa kintama pėsčiųjų apkrova veikiamą LB tilto perdangos plokštę išilginės armatūros kiekį galima sumažinti 12 %. Panaši tendencija gauta ir 5 kPa veikiamai plokštei (4.14 b pav.). Gauta įlinkio vertė beveik nepasikeitė, o išilginės armatūros kiekis sumažėjo 10 %. Gauti rezultatai rodo, kad kuo didesnis yra nuolatinės apkrovos (M_{gk}) ir suminės apkrovos (M_k) sukeltų momentų santykis, tuo didesnis LB naudojimo laikančiosioms konstrukcijoms efektyvumas, leidžiantis sutaupyti didesnę išilginės armatūros kiekį. Perdangos plokštėms šių santykių vertės pateikiamos 4.3 lentelėje.



4.14 pav. Perdangos plokščių modeliavimo rezultatai sumažinus armavimą

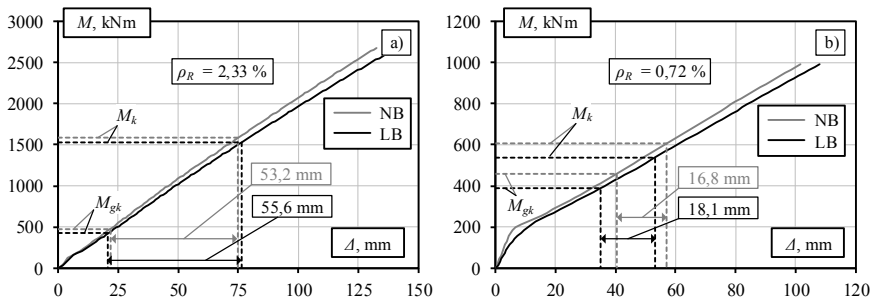
Fig. 4.14. Modelling results of lightweight concrete slabs with reduced reinforcement

Automobilių tilto sijų modeliavimo rezultatai pateikti 4.15 a paveiksle, o pėsčiųjų tilto – 4.15 b paveiksle. Iš 4.15 a paveikslo matyti, kad, esant dideliame armavimo procentui ($\rho_R = 2,33\%$), tų pačių parametų elementų skaitinėje deformacijų analizėje naudojant LB ir NB fizikinius modelius gaunami apytikriai vienodi skaičiavimo rezultatai. Nedideli kreivių skirtumai yra susiję su skirtingais LB ir NB tamprumo moduliais. Rezultatai tarpusavyje sutampa ir dėl to, kad stipriai armuotuose elementuose tempiamojo betono tarp plyšių įtaka standumui yra nereikšminga. Dėl tokio veiksnio bei nedidelio nuolatinės ir suminės apkrovos santykio (0,28–0,30, 4.4 lentelė) betono tankio mažinimas neduoda didelio efekto.

Priešingos tendencijos gautos pėsčiųjų tilto perdangos sijai (4.15 b pav.). Šių sijų nuolatinės ir suminės apkrovos santykis sudaro 0,72–0,76 (4.4 lentelė). Tradicinio ir lengvojo betono sijoms nuo kintamosios pėsčiųjų apkrovos gautos panašios įlinkių vertės atitinkamai 16,8 mm ir 18,1 mm. Detali informacija apie sijų armavimo rezultatus pateikiama 4.4 lentelėje. Nuolatinės apkrovos lygmuo ir gautos įlinkių vertės sudaro galimybes mažinti sijų išilginės armatūros intensyvumą.

Sumažinto armavimo pėsčiųjų tilto LB sijos skaitiniai modeliavimo rezultatai pateikti 4.16 paveiksle. LB sijos armavimo procentui sumažėjus nuo 0,72 % iki

0,64 %, įlinkio vertė padidėjo nuo 18,1 mm iki 20,1 mm. Atsižvelgiant į elemento tarpatramio ilgį, gauta įlinkio vertė yra praktiniu požiūriu priimtina. Šiuo atveju reikalingos armatūros kiekis sumažėja 11 %. Gauti skaitinės analizės rezultatai rodo, kad pasiūlytas deformacijų analizės modelis gali būti patikima priemonė lengvojo betono lenkiamiesiems elementams projektuoti, parenkant optimalius geometrinius ir armavimo parametrus, kuriuos riboja standumo sąlyga.

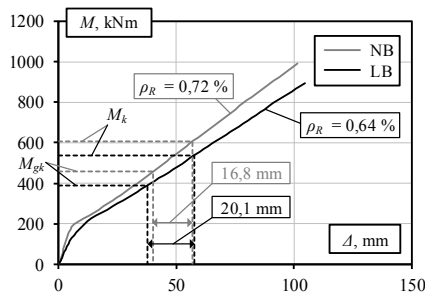


4.15 pav. Sijų modeliavimo rezultatai: a) automobilių tilto; b) pėsčiųjų tilto
Fig. 4.15. Modelling results of girders: a) roadway bridge; b) pedestrian bridge

4.4 lentelė. Projektuojamų sijų charakteristikos ir skaičiavimo rezultatai

Table 4.4. Characteristics and numerical results of designed beams

Eil. Nr.	Betonas	ρ_R , %	Armatūra	A_s , $\times 10^{-4}$ m ²	d, m	M_{gk} , kNm	M_k , kNm	M_{gk}/M_k	M_{ed} , kNm	M_{rms} , kNm	Δ_{gk} , mm
1.	NB	2,33	3×Ø40	86,0	0,765	476	1585	0,30	2140	2669	53,2
2.	LB		6×Ø32			421	1530	0,28			55,6
3.	NB	0,72	3×Ø22	27,1	0,782	459	607	0,76	819	990,5	16,8
4.	LB		5×Ø20			389	537	0,72			18,1
5.	LB	0,64	3×Ø22 5×Ø18	24,1	0,783	389	537	0,72	725	890,0	20,1



4.16 pav. Sijų modeliavimo rezultatai sumažinus LB armavimą
Fig. 4.16. Modelling results of girder with reduced reinforcement ratio

4.5. Ketvirtąjį skyriaus išvados

Apibendrinus ketvirtąjame skyriuje pateiktus rezultatus galima teigti, kad:

1. Pritaikius VGTU mokslininkų sukurtus armuoto betono elementų fizikinio modeliavimo algoritmus bei 3 skyriuje sudarytas eksperimentines momentų ir kreivių diagramas, pasiūlyta lengvojo armuoto tempiamojo betono įtempių ir deformacijų priklausomybė. Fizikinis modelis gautas modifikuojant A. Sokolov pasiūlytą diagramą tradicinio betono elementams. Modifikuotame modelyje, įvertinant lengvojo betono plyšių formavimosi ypatumus, pasirinkti sumažinti pleišėjimo ribą charakterizuojantys įtempiai. Siūlomas modelis aproksimuotas trijų kreivių diagrama. Kylančioji kreivės dalis aprašo tampriąją betono elgseną iki pleišėjimo. Horizontalioji ir krintančioji dalys apibūdina plyšių formavimosi bei vystymosi stadijas.
2. Siūlomo modelio atitiktis patikrinta naudojant literatūroje paskelbtus armuotų lengvojo betono elementų eksperimentinius duomenis. Duomenų imtį sudarė 5 skirtingose bandymų programose gauti 51-o lenkiamojo elemento duomenys. Eksperimentinių siūlytų skaitinė analizė atlikta netiesinio skaičiavimo baigtinių elementų programa ATENA, tempiamojo betono elgsenai modeliuoti taikant siūlomąjį fizikinį modelį. Teoriniai rezultatai papildomai apskaičiuoti taikant inžinerinius EC2, STR ir ACI projektavimo normų metodus. Sugrętinus teorinius ir eksperimentinius rezultatus, nustatyta, kad siūlomu modeliu gautami tiksliausi skaičiavimo rezultatai. Naudojimo apkrovos lygmenyje ($M_{naud} = 0,6M_{Rm}$, čia M_{Rm} – teorinis vidutinis atlaikomasis lenkimo momentas apskaičiuotas pagal EC2) skaitiniu modeliu gaunamas teorinio ir eksperimentinio kreivių santykio (κ_{th}/κ_{exp}) vidurkis sudarė 0,973, o standartinis nuokrypis – 0,093. Pagal EC2 normas gauto santykio κ_{th}/κ_{exp} vidurkis – 0,857, o standartinis nuokrypis – 0,092. Pagal STR ir ACI normas gautos atitinkamai 0,835 ir 0,164 bei 0,871 ir 0,118 vidurkio bei standartinio nuokrypio vertės.
3. Taikant skaitinį modelį bei projektavimo normų metodus, atlikta armavimo procento ρ_R , betono tankio ρ , betono gniuždomojo stiprio f_{cm} bei susitraukimo deformacijų ε_{shr} įtaka teorinių rezultatų sklaidai naudojimo apkrovos lygmenyje. Nustatyta, kad:
 - EC2 ir ACI normų bei skaitinio modelio tikslumas mažai priklauso nuo armavimo procento. Tuo tarpu STR normų metodu gautam rezultatų tikslumas blogėja mažėjant armavimo procentui.

- Tankio įtaka nagrinėjamų metodų tikslumui yra apytikriai vienoda. Mažėjant tankiui, rezultatų tikslumas taip pat mažėja.
 - Visų metodų tikslumas mažai priklauso nuo gniuždomojo betono stiprio.
 - Betono susitraukimo deformacijų lygio įtaka visų projektavimo normų prognozavimo rezultatams nėra didelė. Tačiau, didėjant susitraukimo deformacijoms, skaičiavimo paklaidos taip pat didėja. Skaitiniu modeliu gaunami rezultatai yra mažiausiai jautrūs susitraukimo deformacijų vertėms.
4. Siūlomo modelio universalumui įvertinti papildomai sugretinti dviejų ekscentriškai tempiamų gelžbetoninių elementų eksperimentiniai ir teoriniai rezultatai. Elemento, kurio armavimo procentas 0,47 %, prognozavimo paklaida, esant naudojimo apkrovai, lygi 1,8 %. Mažai armuotam elementui ($\rho_R = 0,21$ %) gauta 25 % paklaida. Atsižvelgiant į šių elementų elgsenos ypatumus ir stochastinį pleišėjimo pobūdį skaitiniu modeliavimu gauti geri rezultatai. Jie atskleidžia siūlomo modelio universalumą ir galimybes jį taikyti ne tik lenkiamųjų elementų analizei.
 5. Taikant pasiūlytą fizikinį modelį ir baigtinių elementų programą ATENA, palygintos realaus dydžio lengvojo ir tradicinio armuoto betono konstrukcinių elementų (plokščių ir sijų) deformacijos, veikiant nuolatinės bei kintamosios apkrovos trumpalaikiams poveikiams. Nustatyta, kad, veikiant nustatytoms kintamosioms apkrovoms, lengvojo ir tradicinio betono elementams gaunamos artimos įlinkių vertės. Atskleista, kad dėl sumažėjusios nuolatinės apkrovos lengvojo armuoto betono elementuose gali būti sumažintas išilginės armatūros kiekis (darbe gauta iki 12 %), lyginant su tokių pačių parametrų tradiciniais gelžbetoniniais elementais. Lengvojo betono taikymo efektyvumas didėja, didėjant nuolatinės ir suminės apkrovų sukeltų momentų santykiui.
 6. Sukurtas lengvojo betono fizikinis modelis ateityje gali būti taikomas kaip patikima priemonė projektavimo normų metodams tobulinti arba lengvojo betono elementų skaitiniam modeliavimui trumpalaikio apkrovimo atveju. Projektuojant lengvojo betono elementus, būtina papildomai atsižvelgti į ilgalaikius betono valkšnumo ir susitraukimo efektus, elementų atsparumą įstrižajame pjūvyje ir plyšių pločių ribojimą.

Bendrosios išvados

1. Atlikta literatūros apžvalga atskleidė, kad platesnį lengvojo betono naudojimą armuotoms konstrukcijoms riboja patikimų fizikinių modelių ir skaičiavimo metodų stoka. Lengvasis betonas yra išskirtinė medžiaga, kurios savybės lemia ne tik naudojami užpildai ir priedai, bet ir mišinių gamybos technologija. Šiuo požiūriu lengvojo betono konstrukcijų analizei svarbu taikyti universalius fizikinius modelius, leidžiančius įvertinti šios medžiagos elgsenos ypatumus per visą gyvavimo ciklą.
2. Tyrimų metu naudojant skirtingus užpildus, pasiūlytos lengvojo betono mišinių sudėtys. Atlikta eksperimentinė programa (iš viso suformuoti 44 skirtingi savaimė sutankėjantys mišiniai) atskleidė, kad tinkamiausi užpildai lengvojo betono gamybai yra keramzitas bei pūsto stiklo granulės.
3. Tyrimais nustatyta, kad, išlaikant tą patį lengvojo užpildo tūrį mišinyje, tačiau naudojant skirtingus mažos frakcijos pūsto stiklo ir keramzito kiekius, gaunami panašaus tankio (skirtumas iki 6 %), tačiau skirtingo gniuždomojo stiprio (skirtumas iki 26 %) mišiniai. Didžiausias gniuždomasis stipris gaunamas keramzitą tūriškai pakeičiant nuo 5 % iki 20 % pūsto stiklo užpildu.

4. Atlikti mišinių ilgaamžiškumo tyrimai parodė, kad bandiniai su keramzito užpildu ir mišriu keramzito bei pūsto stiklo užpildu atlaiko 200 šaldymo ciklus ir atitinka F200 atsparumo šalčiui klasę. Be to, nustatyta, kad pūsto stiklo užpildas lengvuosiuose mišiniuose gali būti taikomas be apribojimų, susijusių su šarmine korozija.
5. Laboratorijoje pagaminta ir statine trumpalaikė apkrova išbandyta 19 lengvojo armuoto betono sijų. Kai kurioms sijoms panaudojus labai lengvo betono mišinius (tankis 1380 kg/m^3 , gniuždomasis stipris $30,9 \text{ MPa}$) nustatyta, kad, nepaisant pakankamo gniuždomojo stiprio, mažas šių betonų tamprumo modulis ($11,5 \text{ GPa}$) bei didelės susitraukimo deformacijos ($-1,05 \times 10^{-3}$) riboja tokių mišinių praktinį naudojimą konstrukciniams elementams. Tai dar kartą atskleidžia integralų tarpdalykinių tyrimų poreikį inovatyvių sprendimų kūrimo procese.
6. Eksperimentiniams elementams pritaikius atvirkštinio uždavinio algoritmą, gautas supleišėjusio armuoto lengvojo betono fizikinis modelis, kuriame įvertinamas esminis šią medžiagą charakterizuojantis ypatumas – mažesnė nei tradiciniam betonui pleišėjimo riba, kurią lemia mažas lengvųjų užpildų mechaninis atsparumas ir susitraukimo deformacijos iki apkrovimo.
7. Pasiūlytojo modelio atitiktis patikrinta jį pritaikius kitų autorių atliktų eksperimentinių sijų (iš viso surinkti 51 sijos duomenys) deformacijų skaitinėje analizėje baigtinių elementų programa ATENA. Atlikus statistinę lyginamąją gautų rezultatų analizę, nustatyta, kad siūlomo modelio vidutinė santykinė teorinio ir eksperimentinio įlinkio skaičiavimo paklaida sudaro $2,7 \%$. Projektavimo normų metodais gautos tokios paklaidos: EC2 – $14,3 \%$, STR – $16,5 \%$, ACI – $12,9 \%$.
8. Pasiūlytas fizikinis modelis, pritaikytas natūralaus dydžio perdangos plokščių ir sijų skaitinėje deformacijų analizėje. Nustatyta, kad lengvojo betono naudojimas yra efektyvus, esant didesniai nuolatinės apkrovos ir suminės apkrovos sukeltų lenkimo momentų santykiui (M_{gk}/M_k). Šiuo atveju lengvojo betono naudojimas lemia mažesnę reikiamos išilginės armatūros kiekį, lyginant su atitinkamu tradiciniu gelžbetoniniu elementu. Pasirinktomis konstrukcijoms gauta armatūros kiekio ekonomija sudarė iki 12% .
9. Disertacijoje pasiūlyti lengvojo betono mišiniai ir fizikinis modelis gali būti tobulinami atsižvelgiant į armuotų elementų atsparumą įstrižajame pjūvyje, ilgalaikius betono susitraukimo ir valkšnumo aspektus, betono ir armatūros sukibimo ypatumus. Pasiūlytas lengvojo betono fizikinis modelis taip pat gali būti naudojamas kaip patikimas

įrankis projektavimo normų metodų tobulinimui bei inžineriniams projektavimo metodams alternatyviai armuoto betono elementų skaitinei deformacijų analizei.

Literatūra ir šaltiniai

ACI Committee 201. *Guide to durable concrete, ACI Manual of Concrete Practice, Part 1: Materials and General Properties of Concrete, ACI 201.2R-01*, ACI, Detroit, Michigan, 2001, 41 p.

ACI Committee 213. *Guide for Structural Lightweight-Aggregate Concrete, ACI 213R-14*, ACI, Farmington Hills, Michigan, 2014, 57 p.

ACI Committee 224. *Cracking of Concrete Members in Direct Tension, ACI 224.2R-92(04)*, ACI, Farmington Hills, Michigan, 2004, 11 p.

ACI Committee 318. *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, ACI 318-14*, ACI, Farmington Hills, Michigan, 2014, 524 p.

Ahmad, S. H., Barker, R. 1991. Flexural behavior of reinforced high-strength lightweight concrete beams, *Structural Journal*, 88(1), 69–77.

Ahmmad, R., Jumaat, M. Z., Bahri, S., Islam, A. S. 2014. Ductility performance of lightweight concrete element containing massive palm shell clinker, *Construction and Building Materials*, 63, 234–241.

Akeiber, H., Nejat, P., Majid, M. Z. A., Wahid, M. A., Jomehzadeh, F., Famileh, I. Z., Calautit, J. K., Hughes, B. R., Zaki, S. A. 2016. A review on phase change material (PCM) for sustainable passive cooling in building envelopes, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1470–1497.

Alengaram, U. J., Jumaat, M. Z., Mahmud, H. 2008. Influence of sand content and silica fume on mechanical properties of palm kernel shell concrete, *In International conference on construction and building technology ICCBT*, 251–262.

Al-Khaiat, H., Haque, N. 1999. Strength and durability of lightweight and normal weight concrete, *Journal of materials in civil engineering*, 11(3), 231–235.

Allam, S. M., Shoukry, M. S., Rashad, G. E., Hassan, A. S. 2012. Crack width evaluation for flexural RC members, *Alexandria engineering journal*, 51(3), 211–220.

Alqahtani, F. K., Ghataora, G., Khan, M. I., Dirar, S. 2017. Novel lightweight concrete containing manufactured plastic aggregate, *Construction and Building Materials*, 148, 386–397.

Alshaikh, A. H., Al-Zaid, R. 1993. Effect of reinforcement ratio on the effective moment of inertia of reinforced concrete beams, *Structural Journal*, 90(2), 144–149.

Al-Sibahy, A. F. H. 2012. *Thermo-mechanical behaviour of a novel lightweight concrete and its application in masonry walls*. PhD thesis.

Al-Zaid, R. Z., Al-Shaikh, A. H., Abu-Hussein, M. M. 1991. Effect of loading type on the effective moment of inertia of reinforced concrete beams, *Structural Journal*, 88(2), 184–190.

Argyris, J., Kacianauskas, R. 1996. Semi-analytical finite elements in the higher-order theory of beams, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 138(1–4): 19–72.

Ayati, B., Ferrándiz-Mas, V., Newport, D., Cheeseman, C. 2018. Use of clay in the manufacture of lightweight aggregate, *Construction and Building Materials*, 162, 124–131.

Babu, D. S., Babu, K. G., Wee, T. H. 2005. Properties of lightweight expanded polystyrene aggregate concretes containing fly ash, *Cement and Concrete Research*, 35(6), 1218–1223.

Babu, K. G., Babu, D. S. 2003. Behaviour of lightweight expanded polystyrene concrete containing silica fume, *Cement and Concrete Research*, 33(5), 755–762.

Bačinskas, D. 2002. *Lenkiamųjų gelžbetoninių elementų ilgalaikio deformavimo integralinis modelis*. Daktaro disertacija. Vilniaus Gedimino technikos universitetas.

Bačinskas, D., Kaklauskas, G., Gribniak, V., Sung, W. P., Shih, M. H. 2012. Layer model for long-term deflection analysis of cracked reinforced concrete bending members, *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(2), 117–127.

Bai, Y., Ibrahim, R., Basheer, P. M. 2004. Properties of lightweight concrete manufactured with fly ash, furnace bottom ash, and lytag, *In International workshop on sustainable development and concrete technology*, 77–88.

Bazant, Z. P. 1984. Size effect in blunt fracture: concrete, rock, metal, *Journal of Engineering Mechanics*, 110(4), 518–535.

- Bazant, Z. P., Planas, J. 1997. *Fracture and size effect in concrete and other quasibrittle materials*, CRC press, 640 p.
- Beeby, A. W., Scott, R. H., Jones, A. E. K. 2005. Revised code provisions for long-term deflection calculations, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, 158(1), 71–75.
- Bentz, D. P., Snyder, K. A. 1999. Protected paste volume in concrete: Extension to internal curing using saturated lightweight fine aggregate, *Cement and Concrete Research*, 29(11), 1863–1867.
- Bentz, D. P., Weiss, W. J. 2011. *Internal curing: a 2010 state-of-the-art review*. Gaithersburg, Maryland: US Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology, 94 p.
- Bentz, E. C. 2005. Explaining the riddle of tension stiffening models for shear panel experiments, *Journal of Structural Engineering*, 131(9), 1422–1425.
- Bernardo, L. F., Nepomuceno, M. C., Pinto, H. A. 2016. Flexural ductility of lightweight-aggregate concrete beams, *Journal of Civil Engineering and Management*, 22(5), 622–633.
- Bilodeau, A., Chevrier, R., Malhotra, M., Hoff, G. C. 1995. Mechanical properties, durability and fire resistance of high-strength lightweight concrete, *In International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, Norwegian Concrete Association, Oslo Norway, 432–443.
- Bingöl, A. F., Gül, R. 2004. Compressive strength of lightweight aggregate concrete exposed to high temperatures, *Indian Journal of Engineering & Materials Science*, 11, 68–72.
- Bischoff, P. H. 2008. Discussion of “Tension stiffening in lightly reinforced concrete slabs” by R. Ian Gilbert, *Journal of structural engineering*, 134(7), 1259–1260.
- Bocca, P., Rossetti, U. 1978. Investigation on the cracking behaviour of lightweight concrete, *Materials and Structures*, 11(4), 261–268.
- Bogas, J. A., de Brito, J., Figueiredo, J. M. 2015. Mechanical characterization of concrete produced with recycled lightweight expanded clay aggregate concrete, *Journal of Cleaner Production*, 89, 187–195.
- Bogas, J. A., Gomes, A., Pereira, M. F. C. 2012. Self-compacting lightweight concrete produced with expanded clay aggregate, *Construction and Building Materials*, 35, 1013–1022.
- Bogas, J. A., Gomes, M. G., Real, S. 2014. Bonding of steel reinforcement in structural expanded clay lightweight aggregate concrete: the influence of failure mechanism and concrete composition, *Construction and Building Materials*, 65, 350–359.
- Bogas, J. A., Nogueira, R. 2014. Tensile strength of structural expanded clay lightweight concrete subjected to different curing conditions, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 18(6), 1780–1791.

- Borosnyói, A., Balázs, G. L. 2005. Models for flexural cracking in concrete: the state of the art, *Structural Concrete*, 6(2), 53–62.
- Branson, D. E. 1965. Instantaneous and time-dependent deflections of simple and continuous reinforced concrete beams, *HPR Report 7(1)*, Alabama Highway Department, Bureau of Public Rodas, 78 p.
- Carmo, R. N. F., Costa, H., Simões, T., Lourenço, C., Andrade, D. 2013. Influence of both concrete strength and transverse confinement on bending behavior of reinforced LWAC beams, *Engineering Structures*, 48, 329–341.
- Carmo, R. N. F., Dias-da-Costa, D. 2015. Tensile and flexural behaviour of LWAC members under short-term service loads, *Engineering Structures*, 92, 142–155.
- Carpinteri, A. 1989. Decrease of apparent tensile and bending strength with specimen size: two different explanations based on fracture mechanics, *International Journal of Solids and Structures*, 25(4), 407–429.
- Carreira, D. J., Chu, K. H. 1986. Stress-strain relationship for reinforced concrete in tension, *In Journal Proceedings*, 83(1), 21–28.
- CEB-FIP. International Federation for Structural Concrete (fib). 2013. *Fib model code for concrete structures 2010*, 436 p.
- Chandra, S., Berntsson, L. 2002. *Lightweight aggregate concrete*, Elsevier, 450 p.
- Cheeseman, C. R., Makinde, A., Bethanis, S. 2005. Properties of lightweight aggregate produced by rapid sintering of incinerator bottom ash, *Resources, Conservation and Recycling*, 43(2), 147–162.
- Chi, J. M., Huang, R., Yang, C. C., Chang, J. J. 2003. Effect of aggregate properties on the strength and stiffness of lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, 25(2), 197–205.
- Choi, S. J., Yang, K. H., Sim, J. I., Choi, B. J. 2014. Direct tensile strength of lightweight concrete with different specimen depths and aggregate sizes, *Construction and Building Materials*, 63, 132–141.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Chung, J. S., Cho, S. K. 2005. Effects of waste PET bottles aggregate on the properties of concrete, *Cement and Concrete Research*, 35(4), 776–781.
- Choi, Y. W., Moon, D. J., Kim, Y. J., Lachemi, M. 2009. Characteristics of mortar and concrete containing fine aggregate manufactured from recycled waste polyethylene terephthalate bottles, *Construction and Building Materials*, 23(8), 2829–2835.
- Clark, L. A., Cranston, W. B. 1980. The influence of bar spacing on tension stiffening in reinforced concrete slabs, *In Advances in concrete slab technology*, 118–128.
- Clark, L. A., Speirs, D. M. 1978. Tension stiffening in reinforced concrete beams and slabs under short-term load, *Cement and Concrete Association*, 42(521), 19 p.
- Clarke, J. L. 1993. *Structural lightweight aggregate concrete*, CRC Press, 256 p.

Collins, M. P., Mitchell, D. 1987. *Prestressed concrete basics (1st ed)*. Canadian Prestressed Concrete Institute, Ottawa, 614 p.

Cusson, D., Hoogeveen, T. 2008. Internal curing of high-performance concrete with pre-soaked fine lightweight aggregate for prevention of autogenous shrinkage cracking, *Cement and Concrete Research*, 38(6), 757–765.

Damjanic, F., Owen, D. R. J. 1984. Practical considerations for modelling of post-cracking concrete behaviour for finite element analysis of reinforced concrete structures, *In Proceedings, International Conference on Computer Aided Analysis and Design of Concrete Structures*, Swansea: Pineridge Press, 693–706.

Demirdag, S., Gunduz, L. 2008. Strength properties of volcanic slag aggregate lightweight concrete for high performance masonry units, *Construction and building materials*, 22(3), 135–142.

Dias-da-Costa, D., Carmo, R. N. F., Graça-e-Costa, R., Valença, J., and Alfaiate J. 2014. Longitudinal reinforcement ratio in lightweight aggregate concrete beams, *Engineering Structures*, 81, 219–229.

Dimakar, P. 2012. Properties of fly-ash lightweight aggregate concretes, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 166(3), 133–140.

Domone, P. L. 2006. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies, *Cement and Concrete Composites*, 28(2), 197–208.

EFNARC (European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems). 2002. *Specification and guidelines for self-compacting concrete*, European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete, 32 p.

Eligehausen, R., Popov, E. P., Bertero, V. V. 1982. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations, *Proceedings of the 7th European Conference on Earthquake Engineering*, 4, 69–80.

El-Reedy, M. A. 2016. *Advanced materials and techniques for reinforced concrete structures. Second Edition*, CRC press, 345 p.

EuroLightCon. 1998. Material properties state of the art, *Economic Design and Construction with Light Weight Aggregate Concrete*, 47–48.

Expanded Shale Clay and Slate Institute. 1967. *Lightweight Concrete. History. Application. Economics*. 41 p

Faust, T. 2000. Properties of different matrixes and LWAs and their influences on the behaviour of structural LWAC, *In International symposium on structural lightweight aggregate concrete*, 502–511.

FIP. Fédération Internationale de la Précontrainte. 1983. *Manual of lightweight aggregate concrete*, Surry University Press, 259 p.

Foster, S. J., Marti, P. 2003. Cracked membrane model: finite element implementation, *Journal of Structural Engineering*, 129(9), 1155–1163.

Frosch, R. J. 1999. Another look at cracking and crack control in reinforced concrete, *Structural Journal*, 96(3), 437–442.

Gergely, P., Lutz, L. A. 1968. Maximum crack width in reinforced concrete flexural members, *Special Publication*, 20, 87–117.

Gesoğlu, M., Özturan, T., Güneyisi, E. 2004. Shrinkage cracking of lightweight concrete made with cold-bonded fly ash aggregates, *Cement and Concrete Research*, 34(7), 1121–1130.

Gilbert, R. I. 2007. Tension stiffening in lightly reinforced concrete slabs, *Journal of Structural Engineering*, 133(6), 899–903.

Gilbert, R. I., Warner, R. F. 1978. Tension stiffening in reinforced concrete slabs, *Journal of the structural division*, 104(12), 1885–1900.

Girdžius, R. 2011. *Betono tempiamojo sustandėjimo modelis atitinkantis euronormų nuostatas*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 109 p.

Go, C. G., Tang, J. R., Chi, J. H., Chen, C. T., Huang, Y. L. 2012. Fire-resistance property of reinforced lightweight aggregate concrete wall, *Construction and Building Materials*, 30, 725–733.

Golias, M., Castro, J., Weiss, J. 2012. The influence of the initial moisture content of lightweight aggregate on internal curing, *Construction and Building Materials*, 35, 52–62.

Gribniak V., Kaklauskas G., Idnurm S., Bacinskas D. 2010. Finite element mesh size effect on deformation predictions of reinforced concrete bridge girder, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 5, 19–27.

Gribniak, V. 2009. *Shrinkage influence on tension-stiffening of concrete structures*. Doctoral dissertation. Vilnius: Technika, 215 p.

Gribniak, V., Arnautov, A. K., Kaklauskas, G., Tamulenas, V., Timinskas, E., Sokolov, A. 2015. Investigation on application of basalt materials as reinforcement for flexural elements of concrete bridges, *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 10(3), 201–206.

Gribniak, V., Cervenka, V., and Kaklauskas, G. 2013a. Deflection prediction of reinforced concrete beams by design codes and computer simulation, *Engineering Structures*, 56, 2175–2186.

Gribniak, V., Kaklauskas, G., Juozapaitis, A., Kliukas, R., Meškėnas, A. 2017. Efficient technique for constitutive analysis of reinforced concrete flexural members, *Inverse Problems in Science and Engineering*, 25(1), 27–40.

Gribniak, V., Kaklauskas, G., Kliukas, R., and Jakubovskis, R. 2013b. Shrinkage effect on short-term deformation behavior of reinforced concrete – When it should not be neglected, *Materials and Design*, 51, 1060–1070.

Gribniak, V., Kaklauskas, G., Sokolovas, A., Logunov, A. 2007. Finite Element Size Effect on Post-Cracking Behaviour of Reinforced Concrete Members, *In The 9th international conference "Modern building materials, structures and techniques"*, 563–570.

Gribniak, V., Kaklauskas, G., Torres, L., Daniunas, A., Timinskas, E., Gudonis, E. 2013c. Comparative analysis of deformations and tension-stiffening in concrete beams reinforced with GFRP or steel bars and fibers, *Composites Part B: Engineering*, 50, 158–170.

Grossman, J. S. 1981. Simplified computations for effective moment of inertia I_e and minimum thickness to avoid deflection computations, *In Journal Proceedings*, 78(6), 423–439.

Gudonis, E. 2014. *Trumpalaike ir ilgalaikė apkrova veikiamų tempiamųjų gelžbetoninių elementų deformacijų eksperimentiniai tyrimai ir modeliavimas*. Daktaro disertacija. Vilnius: Tehnika. 134 p.

Gündüz, L., Uğur, İ. 2005. The effects of different fine and coarse pumice aggregate/cement ratios on the structural concrete properties without using any admixtures, *Cement and Concrete Research*, 35(9), 1859–1864.

Hammer, T. A., Smeplass, S. 1995. The influence of lightweight aggregate properties on material properties of the concrete, *In Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete*, 517–532.

Han, J., Jia, D., Yan, P. 2016. Understanding the shrinkage compensating ability of type K expansive agent in concrete, *Construction and Building Materials*, 116, 36–44.

Haque, M. N., Al-Khaiat, H., Kayali, O. 2004. Strength and durability of lightweight concrete, *Cement and Concrete Composites*, 26(4), 307–314.

Haque, N., Al-Khaiat, H. 1999. Strength and durability of lightweight concrete in hot marine exposure conditions, *Materials and Structures*, 32(7), 533–537.

Harmon, K. S. 2004. Norway Bridges Using High Performance Lightweight Aggregate Concrete, *ACI Special Publication*, 218, 189–198.

Holm, T. A. 1980. Performance of structural lightweight concrete in a marine environment, *Special Publication*, 65, 589–608.

Holm, T. A. 1994. Lightweight concrete and aggregates, *In Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials*, ASTM International.

Holm, T. A., Bremner, T. W. 2000. State-of-the-art report on high-strength, high-durability structural low-density concrete for applications in severe marine environments. US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center, 119 p.

Holm, T. A., Bremner, T. W., Newman, J. B. 1984. Concrete bridge decks: lightweight aggregate concrete subject to severe weathering, *Concrete international*, 6(6), 49–54.

Holschemacher, K., Ali, A. 2017. Experimental investigation on bond of reinforcement in steel fibre-reinforced lightweight concrete, *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 251(1), 1–7.

Hossain, K. M. A. 2004. Properties of volcanic pumice based cement and lightweight concrete, *Cement and Concrete Research*, 34(2), 283–291.

Hossain, K. M. A., Ahmed, S., Lachemi, M. 2011. Lightweight concrete incorporating pumice based blended cement and aggregate: Mechanical and durability characteristics, *Construction and Building Materials*, 25(3), 1186–1195.

Ismail, Z. Z., Al-Hashmi, E. A. 2008. Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, *Waste management*, 28(11), 2041–2047.

Jakubovskis, R. 2015. *Suderintas gelžbetoninių elementų pleišėjimo, deformacijų ir sukibimo modeliavimas*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 142 p.

Janavicius, E., Skripkiunas, G., Daukšys, M. 2008. Šaltilčių techninių parametų gerinimas panaudojant keramzitbetonį, *Tarptautinės konferencijos „Pažangioji statyba“ pranešimų medžiaga*, Kaunas: Technologija, 248–254.

Ji, T., Zheng, D. D., Chen, X. F., Lin, X. J., Wu, H. C. 2015. Effect of prewetting degree of ceramsite on the early-age autogenous shrinkage of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 98, 102–111.

Jo, B. W., Park, S. K., Park, J. C. 2008. Mechanical properties of polymer concrete made with recycled PET and recycled concrete aggregates, *Construction and Building Materials*, 22(12), 2281–2291.

Jocius, V. 2017. *Cemento tipo, užpildų ir oro kiekio mišinyje įtaka betono atsparumui ugniai*. Daktaro disertacija, Vilnius: Technika, 138 p.

Juknys, M. 2017. *Tempiamųjų gelžbetoninių elementų diskrečių plyšių modelio fizikinių parametų eksperimentiniai ir skaitiniai tyrimai*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika. 114 p.

Juradin, S., Baloević, G., Harapin, A. 2012. Experimental testing of the effects of fine particles on the properties of the self-compacting lightweight concrete, *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 1–8.

Kaklauskas, G. 1999. A New Stress-Strain Relationship for Cracked Tensile Concrete in Flexure, *Statyba*, 5(6), 349–356.

Kaklauskas, G. 2001. *Integral Flexural Constitutive Model for Deformational Analysis of Concrete Structures*. Monography. Vilnius: Technika, 140 p.

Kaklauskas, G. 2004. Flexural layered deformational model of reinforced concrete members, *Magazine of Concrete Research*, 56(10), 575–584.

Kaklauskas, G. 2017. Crack model for RC members based on compatibility of stress-transfer and mean strain approaches, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 143 (9), 1–12.

- Kaklauskas, G., Cervenka, V., Cervenka, J., Vainiunas, P., Gribniak, V. 2004. Deflection calculation of RC beams: finite element software versus analytical and design code methods, *Proc. of the Tenth International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE-X)*. Weimar: VDG, 8 p.
- Kaklauskas, G., Ghaboussi, J. 2001. Stress-strain relations for cracked tensile concrete from RC beam tests, *Journal of Structural Engineering*, 127(1), 64–73.
- Kaklauskas, G., Gribniak, V. 2011. Eliminating shrinkage effect from moment curvature and tension stiffening relationships of reinforced concrete members, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, 137(12), 1460–1469.
- Kaklauskas, G., Gribniak, V., Bačinskas, D., Vainiūnas, P. 2009. Shrinkage influence on tension stiffening in concrete members, *Engineering Structures*, 31(6), 1305–1312.
- Kamanli, M., Kaltakci, M. Y., Bahadir, F., Balik, F. S., Korkmaz, H. H., Donduren, M. S., Cogurcu, M. T. 2012. Predicting the flexural behaviour of reinforced concrete and lightweight concrete beams by ANN, *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 19(2), 87–94.
- Kayali, O. 2008. Fly ash lightweight aggregates in high performance concrete, *Construction and Building Materials*, 22(12), 2393–2399.
- Kligys, M., Laukaitis, A., Sinica, M., Sezmanas, G. 2007. The influence of some surfactants on porous concrete properties, *Materials Science*, 13(4), 310–316.
- Kliukas, R., Daniunas, A., Gribniak, V., Lukoseviciene, O., Vanagas, E., Patapavicius, A. 2018. Half a century of reinforced concrete electric poles maintenance: Inspection, field-testing, and performance assessment. *Structure and Infrastructure Engineering*, 14(9), 1221–1232.
- Kockal, N. U., Ozturan, T. 2010. Effects of lightweight fly ash aggregate properties on the behavior of lightweight concretes, *Journal of Hazardous Materials*, 179(1–3), 954–965.
- Kockal, N. U., Ozturan, T. 2011. Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, *Materials & Design*, 32(4), 2396–2403.
- Koh, C. G., Teng, M. Q., Wee, T. H. 2008. A plastic-damage model for lightweight concrete and normal weight concrete, *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 2(2), 123–136.
- Kumar, K. S., Baskar, K. 2015. Recycling of E-plastic waste as a construction material in developing countries, *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 17(4), 718–724.
- Laukaitis, A., Žurauskas, R., Kerien, J. 2005. The effect of foam polystyrene granules on cement composite properties, *Cement and Concrete Composites*, 27(1), 41–47.
- Lin, C. S., Scordelis, A. C. 1975. Nonlinear analysis of RC shells of general form, *Journal of the structural division*, 101(3), 523–538.

Lo, T. Y., Cui, H. Z., Li, Z. G. 2004. Influence of aggregate pre-wetting and fly ash on mechanical properties of lightweight concrete, *Waste Management*, 24(4), 333–338.

LST 1974:2012. *LST EN 206-1 taikymo taisyklės ir papildomieji nacionaliniai reikalavimai*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2012, 48 p.

LST EN 1097-6:2013. *Bandymai užpildų mechaninėms ir fizikinėms savybėms nustatyti. 6 dalis. Dalelių tankio ir įmirkio nustatymas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2013, 49 p.

LST EN 12350-10:2010. *Betono mišinio bandymai. 10 dalis. Susitankinantis betonas. Bandymas, naudojant L pavidalo dėžę*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2010, 12 p.

LST EN 12350-12:2010. *Betono mišinio bandymai. 1 dalis. Susitankinantis betonas. Bandymas, naudojant blokavimo žiedą*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2010, 12 p.

LST EN 12350-9:2010. *Betono mišinio bandymai. 9 dalis. Susitankinantis betonas. Bandymas, naudojant V pavidalo piltuvą*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2010, 12 p.

LST EN 12390-3:2009. *Sukietėjusio betono bandymai. 3 dalis. Bandinių gniuždymo stipris*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2009, 20 p.

LST EN 12390-6:2010. *Betono bandymas. 6 dalis. Bandinių tempimo stipris skeliant*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2010, 16 p.

LST EN 13055:2016. *Lengvieji užpildai*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2016, 52 p.

LST EN 1428-17:2016. *Betonas. Bandymo metodai. 17 dalis. Atsparumo šalčiui nustatymas tūriniu užšaldymu ir atšildymu*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2016, 10 p.

LST EN 1992-1-1:2005. *Eurokodas . Gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas. 1-1 dalis. Bendrosios ir pastatų taisyklės*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2007, 232 p.

LST EN 206:2013. *Betonas. Specifikacija, eksploatacinės savybės, gamyba ir atitiktis*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2013, 90 p.

LST EN 933-1:2012. *Bandymai užpildų geometrinėms savybėms nustatyti. 1 dalis. Granulimetrinės sudėties nustatymas. Sijojimo metodas*. Lietuvos standartizacijos departamentas. Vilnius, 2012, 18 p.

Madandoust, R., Ranjbar, M. M., Yasin Mousavi, S. 2011. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene, *Construction and Building Materials*, 25(9), 3721–3731.

- Maghsoudi, A. A., Mohamadpour, S., Maghsoudi, M. 2011. Mix design and mechanical properties of self compacting light weight concrete, *International Journal of Civil Engineering*, 9(3), 230–236.
- Massicotte, B., Elwi, A. E., MacGregor, J. G. 1990. Tension-stiffening model for planar reinforced concrete members, *Journal of Structural Engineering*, 116(11), 3039–3058.
- Mehta, P. K.; Monteiro, P. J. 2006. *Concrete: microstructure, properties, and materials: 3th Edition*, New York: McGraw-Hill, 684 p.
- Meškėnas, A. 2018. *Serviceability analysis of steel fibre reinforced concrete beams. PhD thesis*. Vilnius: Technika. 122 p.
- Moravia, W. G., Gumieri, A. G., Vasconcelos, W. L. 2010. Efficiency factor and modulus of elasticity of lightweight concrete with expanded clay aggregate, *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 3(2), 195–204.
- Murashev, V. I. 1950. Crack resistance, stiffness and strength of reinforced concrete. Mashinostroizdat, Moscow (Rusų k.).
- Naujokaitis, A. 2007. *Statybinės medžiagos. Betonai: mokomoji knyga*. Vilnius: Technika, 358 p.
- Nayal, R., Rasheed, H. A. 2006. Tension stiffening model for concrete beams reinforced with steel and FRP bars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 18(6), 831–841.
- Nemes, R. 2006. *Lightweight concrete made with expanded glass aggregate*. Summary of PhD thesis, Budapest University of Technology and Economics, Budapest, 13 p.
- Nepomuceno, M. C., Pereira-de-Oliveira, L. A., Pereira, S. F. 2018. Mix design of structural lightweight self-compacting concrete incorporating coarse lightweight expanded clay aggregates, *Construction and Building Materials*, 166, 373–385.
- Neville A. M. 2011. *Properties of concrete. Fifth Edition*. Harlow. 844 p.
- Ng, P. L., Lam, J. Y., Kwan, A. K. 2010. Tension stiffening in concrete beams. Part 1: FE analysis, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 163(1), 19–28
- Nixon, P. J., Sims, I. 2016. *RILEM Recommendations for the prevention of damage by alkali-aggregate reactions in new concrete structures*. RILEM State-of-the-Art Report. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 181 p.
- Oh, B. H., Kang, Y. J. 1987. New formulas for maximum crack width and crack spacing in reinforced concrete flexural members, *Structural Journal*, 84(2), 103–112.
- Olmedo-Zazo, F. I., Valivonis, J., Cobo, A., Llauro-Perez, N. 2018. Experimental study of lightweight and conventional concrete multilayer beams. *DYNA*, 93(2), 182–185.
- Orchard, D. F., Curran, A., Hearne, R. 1979. *Concrete technology volume 1: properties of materials*. An Foras Forbartha, 504 p.

- Paeglitis, A., Sahmenko, G. 2006. Bridges with lightweight aggregate concrete structures, *Baltic Journal of Road & Bridge Engineering*, 1(1), 55–61.
- Peiretti, H. C., Caldentey, A. P., Bernat, A. M., 1991. Time-dependent behavior of prestressed concrete structures – Theoretical model and experimental results, *Proc. Of the International Symposium on Modern Applications of Prestressed Concrete*, Beijing, 2, B148–B155.
- Petrella, A., Petrella, M., Boghetich, G., Petruzzelli, D., Calabrese, D., Stefanizzi, P., de Napoli, D., Guastamacchia, M. 2007. Recycled waste glass as aggregate for lightweight concrete, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Construction Materials*, 160(4), 165–170.
- Piyasena, R. 2002. *Crack spacing, crack width and tension stiffening effect in reinforced concrete beams and one-way slabs*. PhD thesis, Griffith University Goald Coast Campus, 371 p.
- Polak, M. A., Killen, D. T. 1998. The influence of the reinforcing bar diameter on the behavior of members in bending and in-plane tension, *Structural Journal*, 95(5), 471–479.
- Prakhya, G. K. V., Morley, C. T. 1990. Tension-stiffening and moment-curvature relations of reinforced concrete elements, *Structural Journal*, 87(5), 597–605.
- Qiao, X. C., Ng, B. R., Tyrer, M., Poon, C. S., Cheeseman, C. R. 2008. Production of lightweight concrete using incinerator bottom ash, *Construction and Building Materials*, 22(4), 473–480.
- Rakoczy, A. M., Nowak, A. S. 2013. Resistance Model of Lightweight Concrete Members, *ACI Materials Journal*, 110(1), 99–107.
- Ramirez, J. A., Olek, J., Malone, B. J. 2004. Shear strength of lightweight reinforced concrete beams, *Special Publication*, 218, 69-90.
- Rangan, B. V. 1982. Control of beam deflections by allowable span-depth ratios, *In Journal Proceedings*, 79(5), 372–377.
- Real, S., Gomes, M. G., Rodrigues, A. M., Bogas, J. A. 2016. Contribution of structural lightweight aggregate concrete to the reduction of thermal bridging effect in buildings, *Construction and Building Materials*, 121, 460–470.
- Rimkus, A. 2017. *Effects of Bar Reinforcement Arrangement on Deformations and Cracking of Concrete Elements*. PhD thesis, Vilnius: Technika, 156 p.
- Rossignolo, J. A., Agnesini, M. V., Morais, J. A. 2003. Properties of high-performance LWAC for precast structures with Brazilian lightweight aggregates, *Cement and Concrete Composites*, 25(1), 77–82.
- Rozembliumas, A. M. 1964. Calculation methods for revealing stress state of reinforce concrete sections, weakening by the cracks, *Stroitelstvo i Arhitektura*, Kaunas.
- Rumšys, D. 2014. *Armuto lengvojo betono sijų įtempių ir deformacijų būvio analizė*. Magistrinis darbas, VGTU, Vilnius, 97 p.

- Saikia, N., Brito, J. D. 2013. Waste polyethylene terephthalate as an aggregate in concrete, *Materials Research*, 16(2), 341–350.
- Saito, M., Kawamura, M., Arakawa, S. 1991. Role of aggregate in the shrinkage of ordinary portland and expansive cement concrete, *Cement and Concrete Composites*, 13(2), 115–121.
- Scanlon, A., Murray, D. W. 1974. Time-dependent reinforced concrete slab deflections, *Journal of the Structural Division*, 100, 1911–1924.
- Schnobrich, W. C. 1985. The role of finite element analysis of reinforced concrete structures, *Finite element analysis of reinforced concrete structures*, 1–24.
- Scott, R. H., CP 110. 1983. The short term moment-curvature relationship for reinforced concrete beams, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 75(4), 725–734.
- Senhadji, Y., Escadeillas, G., Benosman, A. S., Mouli, M., Khelafi, H., Ould Kaci, S. 2015. Effect of incorporating PVC waste as aggregate on the physical, mechanical, and chloride ion penetration behavior of concrete, *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29(7), 625–640.
- Shafigh, P., Alengaram, U. J., Mahmud, H. B., Jumaat, M. Z. 2013. Engineering properties of oil palm shell lightweight concrete containing fly ash, *Materials & Design*, 49, 613–621.
- Shafigh, P., Chai, L. J., Mahmud, H. B., Nomeli, M. A. 2018. A comparison study of the fresh and hardened properties of normal weight and lightweight aggregate concretes, *Journal of Building Engineering*, 15, 252–260.
- Shafigh, P., Hassanpour, M., Razavi, S. V., Kobraei, M. 2011b. An investigation of the flexural behaviour of reinforced lightweight concrete beams, *International Journal of Physical Sciences*, 6(10), 2414–2421.
- Shafigh, P., Jumaat, M. Z., Mahmud, H. 2010. Mix design and mechanical properties of oil palm shell lightweight aggregate concrete: a review, *International journal of the physical sciences*, 5(14), 2127–2134.
- Shafigh, P., Jumaat, M. Z., Mahmud, H. 2011a. Oil palm shell as a lightweight aggregate for production high strength lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 25(4), 1848–1853.
- Shafigh, P., Jumaat, M. Z., Mahmud, H. B., Hamid, N. A. A. 2012. Lightweight concrete made from crushed oil palm shell: tensile strength and effect of initial curing on compressive strength, *Construction and Building Materials*, 27(1), 252–258.
- Shen, D., Jiang, J., Shen, J., Yao, P., & Jiang, G. 2015. Influence of prewetted lightweight aggregates on the behavior and cracking potential of internally cured concrete at an early age, *Construction and Building Materials*, 99, 260–271.
- Short, A., Kinniburgh, W. 1963. *Lightweight concrete*. CR books. 368 p.

- Siddique, R., Khatib, J., Kaur, I. 2008. Use of recycled plastic in concrete: A review, *Waste management*, 28(10), 1835–1852.
- Sin, L. H., Huan, W. T., Islam, M. R., Mansur, M. A., 2011. Reinforced Lightweight Concrete Beams in Flexure, *ACI Structural Journal*, 108(1), 3–12.
- Sivakumar, A., Gomathi, P. 2012. Pelletized fly ash lightweight aggregate concrete: A promising material, *Journal of Civil Engineering and Construction Technology*, 3(2), 42–48.
- Slate, F. O., Nilson, A. H., Martinez, S. 1986. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *Journal Proceedings*, 83(4), 606–613.
- Smadi, M., Migdady, E. 1991. Properties of high strength tuff lightweight aggregate concrete, *Cement and Concrete Composites*, 13(2), 129–135.
- Sokolov, A. 2010. *Tension stiffening model for reinforced concrete beams*. PhD thesis. Vilnius: Technika, 91 p.
- Spiesz, P., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. 2013. Development of cement-based lightweight composites–Part 2: Durability-related properties, *Cement and Concrete Composites*, 44, 30–40.
- STR 2.05.05:2005. *Statybos techninis reglamentas. Betoninių ir gelžbetoninių konstrukcijų projektavimas*. Vilnius, 2005, 123 p.
- Stramandinoli, R. S., La Rovere, H. L. 2008. An efficient tension-stiffening model for nonlinear analysis of reinforced concrete members, *Engineering Structures*, 30(7), 2069–2080.
- Syroka-Korol, E., Tejchman, J. 2014. Experimental investigations of size effect in reinforced concrete beams failing by shear, *Engineering Structures*, 58, 63–78.
- Tamai, S., Shima, H., Izumo, J., Okamura, H. 1988, Average Stress-Strain Relationship in Post Yield Range of Steel Bar in Concrete, *Concrete Library, JSCE*, 11, 117–129.
- Tanyildizi, H., Coskun, A. 2008. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash, *Construction and Building Materials*, 22(11), 2269–2275.
- Tasnimi, A. A. 2004. Mathematical model for complete stress–strain curve prediction of normal, light-weight and high-strength concretes, *Magazine of concrete research*, 56(1), 23–34.
- Tassew, S. T., Lubell, A. S. 2012. Mechanical properties of lightweight ceramic concrete, *Materials and structures*, 45(4), 561–574.
- Teo, D. C. L., Mannan, M. A., Kurian, V. J. 2006. Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate, *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 30(4), 251–257.

Toutanji, H., Goff, C., Pierce, K., Fares, H. 2015. Using aggregate flowability testing to predict lightweight self-consolidating concrete plastic properties, *Cement and Concrete Composites*, 62, 59–66.

Ulbinas, D. 2012. *Plieno plaušu armuotų gelžbetoninių elementų pleišėjimo ir standumo analizė*. Daktaro disertacija. VGTU. Vilnius: Technika, 98 p.

Vaičiienė, M. 2011. Aktyviųjų priedų poveikis keramzitbetonio struktūrai ir savybėms. Daktaro disertacija. VGTU. Vilnius: Technika, 120 p.

Vakhshouri, B. 2017. Comparative study of the long-term deflection of conventional and self-compacting concrete with light-weight concrete slabs. PhD thesis. University of Technology Sydney, Australia, 571 p.

Vakhshouri, B., Nejadi, S. 2016. Mix design of light-weight self-compacting concrete, *Case Studies in Construction Materials*, 4, 1–14.

Vanagas, E., Kliukas, R., Lukoševičienė, O. 2017. Strength of circular concrete columns reinforced with FRP bars and spirals, *Procedia Engineering*, 172, 1220–1226.

Vebo, A., Ghali, A. 1977. Moment-curvature relation of reinforced concrete slabs, *Journal of the Structural Division*, 103(ASCE 12778).

Vecchio, F. J., Collins, M. P. 1986. The modified compression-field theory for reinforced concrete elements subjected to shear, *ACI Journal*, 83(2), 219–231.

Vengatachalapathy, C., Thirugnanasambandam, S. 2014. Flexural Behavior of Lightweight Aggregate Concrete Beams, *IUP Journal of Structural Engineering*, 7(1), 33–44.

Vidal, T., Castel, A., Francois, R. 2004. Analyzing crack width to predict corrosion in reinforced concrete, *Cement and concrete research*, 34(1), 165–174.

Videla, C., Lopez, M. 2002. Effect of lightweight aggregate intrinsic strength on light-weight concrete compressive strength and modulus of elasticity, *Materiales de Construcción*, 52(265), 23–37.

Walraven, J., Den Uijl, J., Stroband, J., Gijsbers, J., Naaktgeboren, M. 1995. Structural lightweight concrete: Recent research, *HERON*, 40(1), 5–30.

Wang, X. F., Fang, C., Kuang, W. Q., Li, D. W., Han, N. X., Xing, F. 2017. Experimental study on early cracking sensitivity of lightweight aggregate concrete, *Construction and Building Materials*, 136, 173–183.

Wasserman, R., Bentur, A. 1997. Effect of lightweight fly ash aggregate microstructure on the strength of concretes, *Cement and Concrete Research*, 27(4), 525–537.

Wegian, F. M. 2012. Strength properties of lightweight concrete made with LECA grading, *Australian Journal of Civil Engineering*, 10(1), 11–22.

Williams, A. 1986. Tests on large reinforced concrete elements subjected to direct tension, *Cement and Concrete Association*, 562.

- Wollrab, E., Kulkarni, S. M., Ouyang, C., Shah, S. P. 1996. Response of reinforced concrete panels under uniaxial tension, *Structural Journal*, 93(6), 648–657.
- Wu, C. H., Kan, Y. C., Huang, C. H., Yen, T., and Chen, L. H. 2011. Flexural behavior and size effect of full scale reinforced lightweight concrete beam, *Journal of Marine Science and Technology*, 19(2), 132–140.
- Wu, H. C., Sun, P. 2007. New building materials from fly ash-based lightweight inorganic polymer, *Construction and Building Materials*, 21(1), 211–217.
- Wu, L., Farzadnia, N., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H. 2017. Autogenous shrinkage of high performance concrete: a review, *Construction and Building Materials*, 149, 62–75.
- Wu, T., Wei, H., Liu, X. 2018. Experimental investigation of shear models for lightweight aggregate concrete deep beams, *Advances in Structural Engineering*, 21(1), 109–124.
- Wu, Z., Zhang, Y., Zheng, J., Ding, Y. 2009. An experimental study on the workability of self-compacting lightweight concrete, *Construction and Building Materials*, 23(5), 2087–2092.
- Yu, Q. L., Spiesz, P., Brouwers, H. J. H. 2013. Development of cement-based lightweight composites–Part 1: mix design methodology and hardened properties, *Cement and Concrete Composites*, 44, 17–29.
- Yu, R., van Onna, D. V., Spiesz, P., Yu, Q. L., Brouwers, H. J. H. 2016. Development of ultra-lightweight fibre reinforced concrete applying expanded waste glass, *Journal of Cleaner Production*, 112, 690–701.
- Zamblauskaitė, R. 2005. *Iš anksto įtemptųjų gelžbetoninių elementų įtempių ir deformacijų apskaičiavimo sluoksnių modelis*. Daktaro disertacija. Vilnius: Technika, 154 p.
- Zhang, B., Poon, C. S. 2015. Use of furnace bottom ash for producing lightweight aggregate concrete with thermal insulation properties, *Journal of cleaner production*, 99, 94–100.
- Zhang, M. H. 1995. Microstructure, crack propagation, and mechanical properties of cement pastes containing high volumes of fly ashes, *Cement and Concrete Research*, 25(6), 1165–1178.
- Zhang, M. H., Gjorv, O. E. 1991a. Mechanical properties of high-strength lightweight concrete, *Materials Journal*, 88(3), 240–247.
- Zhang, M. H., Gjorv, O. E. 1991b. Permeability of high-strength lightweight concrete, *Materials Journal*, 88(5), 463–469.
- Zhutovsky, S., Kovler, K. 2012. Effect of internal curing on durability-related properties of high performance concrete, *Cement and concrete research*, 42(1), 20–26.

Autoriaus mokslinių publikacijų disertacijos tema sąrašas

Straipsniai recenzuojamuose mokslo žurnaluose

Rumšys, D., Spudulis, E., Bačinskas, D., Kaklauskas, G. 2018. Compressive Strength and Durability Properties of Structural Lightweight Concrete with Fine Expanded Glass and/or Clay Aggregates, *Materials*, 11(12), 2434.

Rumšys, D., Bačinskas, D., Spudulis, E. 2017a. Lengvojo betono, pagaminto naudojant stiklo granulių užpildą, mechaninių savybių tyrimai, *Mokslas-Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos*, 9(5), 500–506.

Rumšys, D., Bačinskas, D., Spudulis, E., Gudonis, E., Sokolov, A. 2014. Armuotojo lengvojo betono lenkiamųjų elementų eksperimentiniai ir teoriniai tyrimai, *Mokslas-Lietuvos ateitis: Statyba, transportas, aviacinės technologijos*, 6(5), 480–487.

Straipsniai kituose leidiniuose

Kaklauskas, G., Rumšys, D., Bačinskas, D., Gribniak, V., NG, P. L. 2018. Serviceability Analysis of Reinforced Lightweight Aggregate Concrete Beams, *Proceedings of Academica International Conference*, Barcelona, Spain, 11th-12th May 2018. Bhubaneswar: IRAJ, 1–5.

Rumšys, D., Bačinskas, D., Spudulis, E., Meškėnas, A. 2017b. Comparison of Material Properties of Lightweight Concrete with Recycled Polyethylene and Expanded Clay

Aggregates, *Procedia Engineering, Modern Building Materials, Structures and Techniques, MBMST 2016*. Amsterdam : Elsevier Ltd. 172, 937–944.

Kaklauskas, G., Lukoševičius, M., Bačinskas, D., Rumšys, D. 2017. Lengvojo armuoto betono sijų atstumo tarp plyšių analizė, *20-osios Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencijos „Mokslas – Lietuvos ateitis“ teminė konferencija „Civilinė inžinerija ir geodezija“*, Vilnius, Lithuania. 1–5.

Rumšys, D., Bačinskas, D., Gribniak, V., Kaklauskas, G., Ramanauskas, R., Augutis, J. 2015. Short-Term Deformation Analysis of Reinforced Beams Made of Lightweight Concrete, *Mechanika 2015: Proceedings of the 20th International Scientific Conference*, 23, 24 April, 2015, Kaunas University of Technology, Lithuania. 219–223.

Rumšys, D. 2014. Trumpalaikė apkrova veikiamų armuoto lengvojo betono sijų deformacijų analizė, *17-oji Lietuvos jaunųjų mokslininkų konferencija "Mokslas - Lietuvos ateitis" 014 metų teminė konferencija "Statyba"*, Vilnius: Technika. 1–7.

Summary in English

Introduction

Problem formulation

The problem discussed in the thesis can be summarized from the aspects of material engineering and structural engineering. In traditional concrete mix optimization studies, the properties of the material are usually analysed only in one or more aspects, such as composition optimization, mechanical resistance, durability, and others. Investigating the influence of one or more parameters on element behaviour often does not produce the final expected effect. Improving the properties of materials in one aspect often leads to a change in other parameters (often these changes worsen the situation). On the other side, the results in material engineering area are often obtained during the investigation of samples of small dimensions, behaviour of which often does not represent peculiarities of technological and mechanical behaviour of the elements applied to load-bearing constructions of structures. Concrete used for these elements must be investigated integrally, starting from composition optimality and ending with an evaluation of the behaviour of the final product (constructional elements) by imitating real operating conditions. It should be stressed that structural lightweight concrete is analysed in the thesis. Many low-density lightweight concrete compositions which are used only for partition walls are proposed in the world and have good thermal insulation and acoustic properties, but a low bearing capacity.

In analysis of reinforced lightweight concrete elements in engineering practice more often the same algorithms are being applied as well as to the elements of normal-weight concrete. Influence of lightweight concrete on construction behaviour is evaluated by

additional empirical coefficients depending on density. Such prognosis of lightweight concrete behaviour often does not coincide with the real behaviour of construction: both width of cracks and deformations of lightweight concrete structural elements are not sufficiently appreciated and the margin of error may reach more than 100%. These tendencies can be explained by the fact that lightweight concrete has a lot of differences in comparison to normal-weight concrete. In particular, the properties of lightweight concrete depend to a large extent on the type, quantity and mechanical properties of lightweight aggregates applied to the mix, as well as on the technology of preparing the concrete mixes. These aspects are hardly evaluated by traditional engineering methods, because these methods were developed for normal-weight concrete mixes which were improved for many years.

Another important aspect is that the shrinkage deformations are not evaluated in the stage before loading. Some researchers argue that namely the shrinkage of concrete in combination with a lower tensile strength determines the earlier cracking of reinforced lightweight concrete elements rather than the traditional engineering methods allow to predict.

The alternative to traditional engineering methods are physical material models used in numerical algorithms, which reflect the behaviour aspects of elements in various stages of operation. A number of physical models were proposed for the analysis of traditional reinforced concrete elements in the world and in Lithuania. However, the author of this thesis could not find any of the models offered specifically for reinforced lightweight concrete.

Relevance of the thesis

In many countries of the world, structures of traditional reinforced concrete constructions make up the majority of all structures. In comparison with other building materials (steel, timber, plastic, aluminium), concrete production volumes are twice as high as of all the other materials put together. Concrete production volume in the world is projected to reach ~28 billion tonnes per year by the year 2050 and to exceed the level of the year 1990 by 4 times.

Despite the substantial advantages of this composite material, it has quite a few disadvantages as well. One of the main disadvantages – high self-weight, which often limits concrete application to large structures: bridges, multi-storey buildings, etc. The latter trend has led to the search for innovative concrete mixes around the world. One way to solve this problem – lighten the concrete. With the help of modern technological solutions, it is possible to create compositions the properties of which are the same and sometimes superior when compared to normal-weight concrete, and volume weight is lower by up to 40%. Use of structural lightweight concrete in house construction has many advantages. Firstly, it has a more effective strength-to-weight ratio, therefore the amount of required concrete and reinforcement reduces and the opportunity to build higher buildings and to reduce costs for foundation installation appears. In this respect, the application of lightweight concrete is of particular importance in strengthening or reconstructing existing structures (e.g. bridges) when additional load on supports or foundation is not possible. On the other hand, lightweight concrete has better heat and sound insulation properties. Investigations done in the world have shown that if lightweight concrete was to be used for buildings in Europe instead of normal-weight concrete, the cost of heat energy could

be reduced by 15%. In addition to the aforementioned advantages, in comparison with normal-weight concrete the lightweight concrete has better durability characteristics (higher frost resistance, etc.), higher fire resistance and higher resistance to earthquakes.

Application of self-compacting concrete mixes gives additional options. Combining lower volume and self-compaction enables to improve the performance and technological properties of concrete and concrete items. By applying self-compacting mixes which do not require additional compaction during production, the cost of constructions on average reduces by 10%, and duration of production by up to 20%.

Despite the many theoretical researches regarding the search of innovative engineering solutions conducted in area of consideration both in the world and in Lithuania, lack of reliable physical models and calculation methods often limits their practical application. Lightweight concrete is an exclusive material, the properties of which are not only determined by used aggregates and additives, but also by the technology of production of mixes. In this respect, it is important to apply universal physical models for the analysis of lightweight concrete constructions, enabling the behavioural characteristics of the latter to be assessed throughout the life cycle. In the aspect of physical modelling, the thesis research is amongst the first ones in Lithuania. From a practical point of view, the results obtained not only make it possible to innovate in business, but also encourages the further balanced development of innovative solutions in Lithuania, changing the traditions which were common in the country's construction industry for many years. The research carried out in the thesis is a continuation of the physical modelling and deformation analysis of reinforced concrete elements carried out by the VGTU researchers' group for more than 20 years.

Research object

The lightweight structural concrete is analysed in this thesis, with a compressive strength class of at least LC30/33, and a density of no more than 2000 kg/m³. The lightweight concrete mixes, their physical, mechanical and durability properties were investigated. Experimental studies of flexural reinforced lightweight concrete elements were conducted, which included tests with short-term static load and measurements of shrinkage until stage of operation. On the basis of these results created by the VGTU, physical model of cracked concrete in tension was modified, which assess behaviour peculiarities and shrinkage of lightweight concrete in the stage before operation. The assessment of adequacy of the proposed model was conducted in relation to the design norms' algorithms applied in engineering practice.

Aim of the thesis

Aim of the thesis – to propose a physical model for stress–strain analysis of reinforced lightweight concrete flexural elements subjected to short–term loading.

Objectives of the thesis

In order to achieve the aim of the thesis these objectives are set:

1. To perform an analysis of reinforced lightweight concrete's physical, mechanical and durability characteristics as well as to review physical models and calculation methods of reinforced concrete elements.

2. To choose compositions of lightweight concrete mixes by applying different aggregates and their combinations and to perform experimental investigations of the physical, mechanical and durability properties of these compositions.
3. To adapt chosen compositions to production of experimental flexural reinforced concrete elements and to test them under short-term static load.
4. By applying the algorithm of inverse analysis, to estimate stress-strain diagrams of cracked reinforced concrete in tension in order to evaluate concrete shrinkage strains in a stage before applying load.
5. By approximating the results obtained, to propose a physical model of reinforced lightweight concrete in order to analyse flexural elements during short-term load.
6. To adapt the proposed model to the numerical modelling of experimental beams conducted by the other authors and to evaluate adequacy of proposed model in relationship to the engineering methods applied in design norms.
7. To perform numerical modelling of reinforced structural lightweight concrete flexural elements of full size and to compare the obtained results with relevant results obtained for traditional reinforced concrete elements.

Research methodology

Experimental, analytic and numerical methods were applied in the thesis. In the experimental lightweight concrete composition program, the physical, mechanical and technological properties of the constituents and lightweight concrete have been determined in accordance with the harmonized LST EN standards. The structure of concrete was studied by scanning electron microscopy method. Relationships of moments and curves were obtained from the experimental reinforced flexural elements program and applied to the approximation of physical model by using the algorithm of inverse analysis. The adequacy of the proposed model is assessed by statistical analysis of experimental data published by the other authors. The stage of decomposition of the elements is not analysed in this thesis.

Scientific novelty of the thesis

- Behaviour of lightweight concrete was analysed by interdisciplinary combining the peculiarities of material engineering and structural research.
- Self-compacting lightweight concrete mixes were proposed for the first time in Lithuania, in which expanded clay and recycled glass granules as well as their combinations were used.
- Selected mixes were used in experimental research of reinforced beams, the results of which revealed the peculiarities of behaviour of different mixes and their possibilities for constructive practical application.
- Using an of inverse analysis created by VGTU algorithm and experimental research data for experimental elements of different mixes, the stress and strain diagrams of cracked reinforced concrete were determined, and after the

approximation of these, the physical model of reinforced lightweight concrete was proposed for an analysis of strain of these elements.

- The physical model is adapted to the comparative numerical analysis of experimental reinforced lightweight concrete beams which were taken from literature and confirmed the adequacy and accuracy of the proposed model in terms of the design norms methods applied in engineering practice.
- For the assessment of lightweight concrete mixes application for bearing structures, a numerical analysis of a natural-sized slab and simply supported beam was carried out to reveal aspects of the practical application of lightweight concrete.

Practical value of research findings

Compositions of lightweight concrete were created during the research by applying different lightweight aggregates and their combinations. A self-compacting lightweight concrete mix was proposed, which can reduce construction production time and cost. Physical model of cracked lightweight concrete was proposed, in which the main peculiarity characterizing this material is assessed – a lower cracking limit for traditional concrete due to low mechanical resistance of light aggregates and shrinkage strains until loading. In the future, with additional research and evaluation in the fields of reinforced lightweight concrete resistance in diagonal section, long-term shrinkage and creep effects, concrete and reinforcement adhesion aspects, the proposed algorithm can be a great tool for designing reinforced lightweight concrete bearing structures.

Defended statements

1. By maintaining the same volume of lightweight aggregate in the mix, the best results in terms of density and compressive strength are obtained by combining different types and sizes of lightweight aggregates of expanded clay and expanded glass.
2. Expanded glass aggregate in lightweight concrete mixtures can be applied without restrictions related to alkaline corrosion.
3. Due to the low mechanical strength of the lightweight aggregate, maximum cracking stress in the constitutive model of structural lightweight aggregate concrete is on average 45% lower when compared to traditional RC elements.
4. The proposed constitutive model of structural lightweight aggregate concrete can be used as a tool for the improvement of design code methods and numerical modelling of lightweight reinforced concrete elements subjected to short-term loading.

Approval of research findings

There are 8 scientific publications published on the theme of this thesis, one in a journal with a citation index, two – in conference proceedings which are referenced in the *Clarivate Analytics Web of Science* database.

Research carried out in the thesis contributed to the results of the project of group of scientists “Development and Application of Physical Models of Reinforced Self-

Compacting Lightweight Concrete Elements”, which was funded by the Research Council of Lithuania.

The results of research conducted in the thesis were published in 5 reports at 4 scientific conferences:

- International Conference “*Civil and Environmental Engineering*”, 2018, Barcelona;
- International Conference “*Modern Building Materials, Structures and Techniques*”, 2017, Vilnius;
- International Conference “*Mechanics 2015*”, 2015, Kaunas;
- Conference for Lithuanian Junior Researchers “*Science – Future of Lithuania*”, 2014, 2017, Vilnius.

One article was published on the theme of the thesis in journal “Construction and Architecture” which promotes science and a report was presented at the 7th National Conference “Building Structures”.

Structure of the thesis

The thesis consists of an introduction, 4 chapters and general conclusions. There are also 3 annexes. Apart from annexes, the volume of work is 157 pages, 72 numbered formulas, 43 figures and 25 tables are used in the text. 228 literature sources were used in writing the thesis.

Acknowledgements

The author of this thesis extends his warm gratitude to the supervisor of his research work, Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics, Assoc. Prof. Dr Darius Bačinskas for his ideas and advices for preparing this thesis.

For the consultation and assistance in the preparation of the thesis, the author expresses great appreciation to the researcher of the Laboratory of Composite Materials Dr Edmundas Spudulis, Professor of Department of Reinforced Concrete Structures and Geotechnics Prof. Dr Habil. Gintaris Kaklauskas, Professor of the Department of Steel and Composite Structures Dr Viktor Gribniak. For help and friendliness in conducting experimental research, the author is grateful to the senior scientist of the Laboratory of Innovative Building Structures Dr Aleksandr Sokolov. For access to the laboratory equipment of the Institute of Building Materials, the author is grateful to the staff of this Institute. For valuable comments and remarks, the author expresses great appreciation to Prof. Dr Juozas Valivonis, Prof. Dr Romualdas Kliukas and Dr Rimvydas Stonys.

The author of the thesis expresses his gratitude to the Research Council of Lithuania for financial support during doctoral studies. He also thanks the Education Exchanges Support Foundation and the COST Association for their funding and the opportunity to study abroad.

For constant support and patience in preparing the thesis, the author expresses his sincere gratitude to his parents Edita and Kęstutis, brother Giedrius, and most of all to his wife Aušra and children Ema and Faustas.

1. Overview of physical models and analysis methods of lightweight concrete elements

The first chapter provides a brief historical overview of the development of lightweight concrete and its disadvantages and advantages over normal-weight concrete. Previous research on structural lightweight concrete in Lithuania is discussed. Description of aggregates for lightweight concrete mixtures and their classification is presented. Physical, technological and mechanical properties of lightweight concrete mixtures are discussed, emphasizing differences to normal-weight concrete. Analytical methods of calculation of load-bearing capacity and strains of reinforced concrete elements are analysed, physical models of lightweight concrete and numerical methods are discussed.

The literature review revealed that despite the various differences between lightweight and normal-weight concrete, reinforced lightweight concrete elements are subject to the same load capacity and strain calculation methods as normal concrete. In most cases, the influence of lightweight concrete is indirectly assessed by relevant mechanical properties. These properties are calculated the same as for normal-weight concrete, but in addition using empirical coefficients are used depending on the concrete density. Such indirect evaluation often does not reflect the true behaviour of lightweight concrete. Another important aspect of strain analysis of reinforced concrete elements is the evaluation of shrinkage strains at the stage before loading. When compared to normal-weight concrete, lightweight concrete has higher shrinkage strains, making it an increasing challenge. Current design norms do not directly assess shrinkage strains which reduce the tensile strength of reinforced lightweight concrete. As a result of these aspects, the strain of reinforced concrete elements is often underestimated. The literature provides a number of physical models for reinforced concrete in tension that can be used in numerical modelling. However, normal-weight concrete models are not always suitable for simulation of lightweight reinforced concrete modelling. The author has not been able to find any model of reinforced lightweight concrete in tension specifically intended for lightweight concrete.

2. Selection of lightweight concrete composition

The second chapter describes studies of the selection of lightweight concrete composition. A large-scale experimental research program was developed for the selection of lightweight concrete. In total, 44 different self-compacting mixtures were formed using various lightweight aggregates. The test program is divided into 4 stages according to the type of lightweight aggregate:

1. Research of mechanical and physical properties of the mixture using different plastic aggregates. In total, 12 different mixtures were formed: 10 of them with a plastic aggregate and 2 reference mixtures with an expanded clay aggregate. The aim of the research was to find out if the mechanical properties of concrete with different forms of plastic aggregate are better than that of concrete with expanded clay aggregate. In all cases, the volume of lightweight aggregate in the mixture remained the same. Furthermore, the same composition of cement mixture was retained, where in one case ground quartz sand (MKS) was used as a microfiller, and in another – micro silica (MS).

2. Investigation of mechanical and physical properties of the mixture using expanded glass aggregate. A total of 18 mixtures were formed. The studies sought to determine the relationships of compressive strength and density using a small fraction (0.5 to 1 mm) expanded glass aggregate and to compare these relationships with those obtained by using a common to the lightweight concrete aggregate of expanded clay of a larger fraction (2–4 mm). The sand contained in all mixtures, by volume (8.5, 16.7; 33.3; 66.7 and 100% of the volume of sand) was replaced with a lightweight aggregate while maintaining a uniform composition of the matrix mixture. Different microfillers were also used in each group: in one case MKS, in the other – MS. Reference samples without lightweight aggregate, but with different microfiller, were as well concreted.
3. Investigations of mechanical and physical properties of the mixture using a combined expanded glass and expanded clay aggregate (8 mixtures in total). The purpose of these studies is to combine expanded glass and expanded clay aggregates in various proportions while maintaining the same composition of the matrix mixture and to monitor the influence of proportions on compressive strength, density and lightweight aggregate distribution.
4. Investigation of mechanical and physical properties of the mixture using an expanded clay aggregate (6 mixtures in total). The purpose of these studies is to determine the influence of superplasticizer quantity on the properties of the mixture which is composed from self-compacting lightweight concrete with expanded clay aggregate and to check whether it is possible to reduce the amount of cement by replacing it with fly ash.

After performing the experimental part of the mixture development, the mixtures were selected and their rheological and durability properties were investigated. The following mixtures were selected: K1920 (with expanded clay aggregate, density 1947 kg/m³, compressive strength 51.6 MPa), PSU20 (with combined expanded clay and expanded glass aggregate, density 1802 kg/m³, compressive strength 44.3 MPa), PS9 (with expanded glass aggregate, density 1360 kg/m³, compressive strength 39.6 MPa).

After summarizing the results of these studies, it was found that in blends with plastic aggregates, the compressive strengths ranged from 40 to 49.2 MPa, and the density after 28 days ranged from 1954 to 2044 kg/m³. Compressive strengths of reference mixtures with the same matrix composition, but with expanded clay aggregate, were obtained to be on average 35% higher (66.1–70.2 MPa), and densities similar (1932–1975 kg/m³).

It was found that by changing the volume of sand into the lightweight aggregates progressively, for lightweight concrete with different lightweight aggregates (expanded glass or expanded clay) and different microfiller (MKS or MS), similar relationships of compressive strength and density are obtained. It was also found that for mixtures with expanded glass granules the density of which are lower than 1900 kg/m³, the ground quartz sand microfiller was more effective than micro silica. The maximum compressive strength at a density lower than 1600 kg/m³ was obtained for mixture with expanded glass aggregate and ground quartz sand microfiller (compressive strength 52.9 MPa, density 1569 kg/m³). The minimum density was obtained for mixture with expanded glass aggregate and micro silica microfiller (compressive strength 39.5 MPa, density 1458 kg/m³).

While maintaining the same volume of lightweight aggregate in the mixture, but combining expanded glass and expanded clay aggregates of low fraction in different proportions, a concrete of similar density is obtained (difference up to 6%), but different compressive strength (difference up to 26%) observed. It was found that the best compressive strength results are obtained by changing from 5% to 20% expanded clay into the expanded glass aggregate of the same volume.

After research related to the influence of superplasticizer (2%, 2.5% and 3% of the cement mass) and cement change into fly ash (10%, 20% and 30% of the cement mass was changed) on mechanical properties of mixtures was undertaken, it was found that the maximum compressive strength is obtained when the quantity of superplasticizer is 2.5% of the cement mass (compressive strength 5.5% higher than using reference quantity of superplasticizer, i. e. 2.0%). Early age strength decrease is noticed when changing part of the cement into fly ash, early age strength decrease is noticed. After 7 days, the compressive strength decreases by 11.0–17.3%, and after 28 days the compressive strength is close to the reference strength, but remains 3.5–6.1% lower.

The freeze-thaw resistance test results showed that samples with expanded clay aggregate (K1920) and mixed expanded clay and expanded glass aggregate (PSU20) withstand 200 cycles of freeze-thaw and fall into the F200 resistance class. However, PS9 mixture with expanded glass aggregate did not withstand 150 cycles of freeze-thaw.

Alkaline corrosion tests were performed for a mixture without lightweight aggregate and for a mixture with expanded glass aggregate. The results of the tests showed that the experimentally obtained limit of elongation for both mixtures is approximately 0.045% and does not exceed the recommended limit value of 0.075%. The studies carried out confirm that expanded glass aggregate in lightweight mixtures may be applied without restriction related to alkaline corrosion. For further research of reinforced lightweight concrete, the mixtures of different density with expanded clay (K1920) and expanded glass (PS9) aggregates were selected.

3. Experimental investigation of reinforced lightweight concrete beams

In this chapter designed mixtures of lightweight concrete were used for production of experimental reinforced concrete beams. Experimental research of reinforced lightweight concrete beams under short-term load was conducted to analyse stress and strain state of beams. 22 flexural elements were tested in a laboratory with different design reinforcing ratios: 0.32%, 0.48%, 0.57% and 0.90%. During the research, monitoring parameters include the vertical displacements in the pure bending zone and the surface deformations determined at four different levels along the depth of the beams (in total 14 measurement points). Furthermore, both strains of elements and development of cracking were additionally monitored by applying a digital image correlation (DIC) system. The results obtained were used to create experimental diagrams of bending moments and curvatures, which were compared to theoretically calculated ones by applying valid in Lithuania LST EN, STR and valid in America ACI methodologies of design norms.

Table S3.1. Mix compositions

Material	Quantity				
	K1920 ¹	K1920 ²	PS9	Normal weight	DR-K10
Sand (0–4 mm), kg/m ³	900	–	–	1165	967
Expanded clay (2–4 mm), kg/m ³	297	–	–	–	248
Crushed stone (2–5 mm), kg/m ³	–	–	–	715	–
Expanded glass (0.5–1 mm), kg/m ³	–	270	–	–	–
CEM I 42.5R, kg/m ³	608	–	–	425	578
CEM I 52.5R, kg/m ³	–	803	–	–	–
Microsilica, kg/m ³	–	42	–	–	25
Ground quartz sand, kg/m ³	113	95	–	–	83
Superplasticizer (SP1), % from cement	–	–	–	0.5	0.5
Superplasticizer (SP2), % from cement	–	–	–	3.0	3.0
Superplasticizer (SP3), % from cement	2.0	1.5	–	–	–
Rheological agent (RP), % from cement CEM	0.025	0.0375	–	–	–
V/C	0.33	0.30	0.26	0.35	0.26

Table S3.2. Properties of lightweight concrete

No.	Mixture	7/28/B days (B – testing day)				Testing day	ε_{shr} ×10 ⁻⁶
		f_{lem} MPa	f_{lcubes} MPa	E_{lem} GPa	ρ , kg/m ³		
1	K1920 ¹	33.6/36.8/36.8	38.8/42.1/42.1	22.4/20.1/20.1	1945/1927/1898	28–29	–58
2	K1920 ²	41.2/44.7/48.5	40.8/42.2/51.7	–/24.4/28.3	1984/1959/1949	141	–468
3	PS9 ¹	29.0/–/29.0	35.2/–/35.2	11.4/–/11.4	1379/–/1379	7	–1050
4	PS9 ²	34.4/–/34.4	32.5/–/32.5	11.5/–/11.5	1381/–/1381	7	
5	PS9 ³	29.4/–/29.4	35.0/–/35.0	11.7/–/11.7	1405/–/1405	7	
6	PS9 ⁴	–/–/–	35.3/–/35.3	–/–/–	1399/–/1399	7	
7	Normal weight	35.4/39.2/41.6	46.3/58.4/61.9	–/–/–	2370/2363/2318	556–557	–611
8	DR-K10	39.6/46.4/49.2	42.3/56.1/54.7	26.2/25.5/24.4	1902/1897/1894	41–42	–199

Compositions of mixtures used for production of experimental elements are presented in Table S3.1. In order to estimate mechanical properties of the mixture, reference cubes (150×150×150) and cylinders (Ø150×300) were casted and tested. In order to estimate shrinkage strains, 100×100×400 mm prisms were casted. The results obtained are presented in Table S3.2 (value of shrinkage was measured at the test day).

Design dimensions of experimental beams – 100×200×1500 mm, calculated length – 1200 mm. All beams are reinforced with S500 class rebars. In order to ensure the resistance of beam in shear they were reinforced with transverse Ø6 reinforcement. Principal scheme of beam reinforcement is presented in Fig. S3.1a. Clear cover of concrete for longitudinal rebars is 20 mm. The beams are divided into 5 groups according to the mixture used and these groups into subgroups by the reinforcement ratio (Fig. S3.1b shows the cross sections of the elements depending on the reinforcement ratio). Detailed information on experimental elements is provided in Table S3.3.

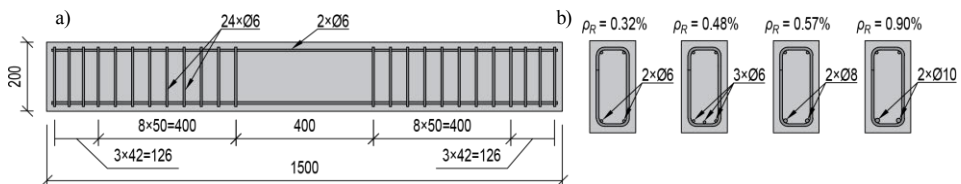
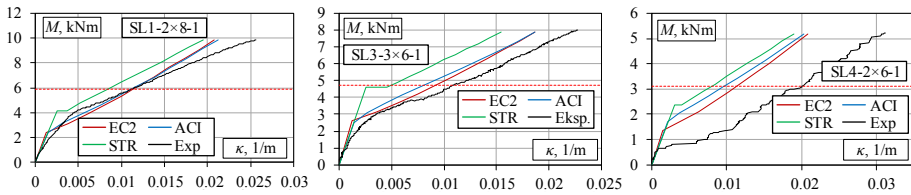
**Fig. S3.1.** Geometry of beams: a) reinforcement scheme; b) cross-sections (dimensions in mm)

Table S3.3. Characteristics of reinforced lightweight concrete experimental beams

No.	Group	Beam code	Mixture used	Type of aggregate	Test day	h , mm	b , mm	d , mm	a_1 , mm	a_2 , mm	A_1 , cm ²	A_2 , cm ²	ρ_R , %
1	1	SL1-2×6-1	DR-K10	K(2-4)	42	198	104	175	23	25	0.565	0.565	0.310
2		SL1-2×6-2				200	102	180	20	29			0.308
3		SL1-2×8-1			41	199	102	177	22	28	1.005		0.556
4		SL1-2×8-2				200	102	177	23	26			0.557
5		SL1-2×10-1				199	102	175	24	27	1.571		0.882
6		SL1-2×10-2				200	99	175	25	24			0.908
7	2	SL2-2×6-1	K1920 ¹		29	200	104	173	27	32	0.565	0.565	0.302
8		SL2-2×6-2				199	104	172	27	25			0.306
9		SL2-2×6-3				197	106	172	25	26			0.302
10		SL2-3×6-1			28	200	102	176	24	30	0.820		0.457
11		SL2-3×6-2				200	104	178	22	31			0.446
12	3	SL3-2×6-1	K1920 ²		141	198	103	176	22	32	0.565		0.312
13		SL3-3×6-1				198	105	175	23	30	0.820		0.446
14		SL3-2×8-1				199	102	175	24	36	1.005		0.563
15		SL3-2×10-1				200	99	175	25	31	1.571		0.907
16	4	SL4-2×6-1	PS9 ¹	PS(0.5-1)	7	197	104	174	23	23	0.565	0.565	0.312
17		SL4-2×6-2	PS9 ²			198	105	177	21	23			0.305
18		SL4-2×8-1	PS9 ³			199	103	177	22	23	1.005		0.551
19		SL4-2×8-2	PS9 ⁴			197	103	174	23	23			0.562
20	5	SN5-2×6-1	NB	Granite stone 2-5 mm	556	199	102	174	25	23	0.565	0.565	0.318
21		SN5-2×8-1				198	103	173	25	23	1.005		0.564
22		SN5-2×10-1			557	198	101	173	25	23	1.571		0.899

**Fig. S3.2.** Comparison of experimental and theoretical results of selected beams

During the short-term loading test of reinforced lightweight concrete beams, the experimental diagrams of moments and curvatures were estimated and compared to theoretical diagrams obtained by methods of design norms EC2, STR and ACI. The comparison was made at a level which corresponds to service load $M_{ser} = 0.6M_{Rm}$ (M_{Rm} – theoretical ultimate bending moment according to EC2). The results of selected beams are presented in Fig. S3.2. It was found that the average calculation margin of error obtained by EC2 norms (ratio between subtraction of theoretical and experimental curvature with experimental curvature is expressed as a percentage) was 1.53% (mean of theoretical and experimental curvature ratio $x_m = 0.985$, standard deviation $\sigma_{std} = 0.389$). Respectively, STR norms – 42.7% ($x_m = 0.573$, $\sigma_{std} = 0.241$), ACI – 20.6% ($x_m = 0.794$, $\sigma_{std} = 0.263$). Despite the fact that the average margin of error of EC2 norms for analysed cross-section elements is low, a large scatter of results ($\sigma_{std} = 0.389$) is observed.

Influence of shrinkage strains in a stage before load is not directly evaluated in all methodologies of analysed norms. Due to shrinkage strains the level of element cracking load decreases. In the case of lightweight concrete, shrinkage strains may be higher than that of normal-weight concrete, therefore level of cracking load decreases even more. As

a result, one of the main aspects which worsens the accuracy of design norms is absence of direct evaluation of shrinkage. In order to better predict the strains of lightweight concrete elements and to obtain a smaller variation of theoretical results, the shrinkage effect in the stage prior to loading must be evaluated. These effects can be assessed using numerical models and physical models of materials.

4. Constitutive model of lightweight concrete and deformation analysis of flexural elements

The constitutive modeling of RC beams was carried out by an inverse technique proposed by Kaklauskas and Ghaboussi (2001). Using the inverse technique, stress–strain tension-stiffening relationships are obtained from the moment-curvature diagrams of the test beams. The methodology uses a layered section model based on a successive application of the direct (curvature prediction) and inverse (constitutive modelling) approaches. Furthermore, following the methodology proposed by Kaklauskas and Gribniak (2011), the shrinkage effect was eliminated from the derived tension-stiffening relations. In summary, the stress and strain diagrams of reinforced lightweight concrete in tension were obtained using a three-step calculation algorithm, an example of which is shown in Fig. S4.1. In the first step, the inverse task was being solved by using experimental moment-curvature diagram (Fig. S4.1a) and the stress–strain curve of reinforced concrete in tension obtained (Fig. S4.1b). In the second step, the newly obtained curve of concrete in tension was used in the direct task, but the shrinkage strains were evaluated additionally. This resulted in a moment-curvature diagram with eliminated shrinkage strains (Fig. S4.1c). In the third step, the inverse task is resolved again by using a moment-curvature diagram with eliminated shrinkage and stress-strain curve of reinforced concrete in tension was obtained by eliminating the effect of shrinkage (Fig. S4.1d).

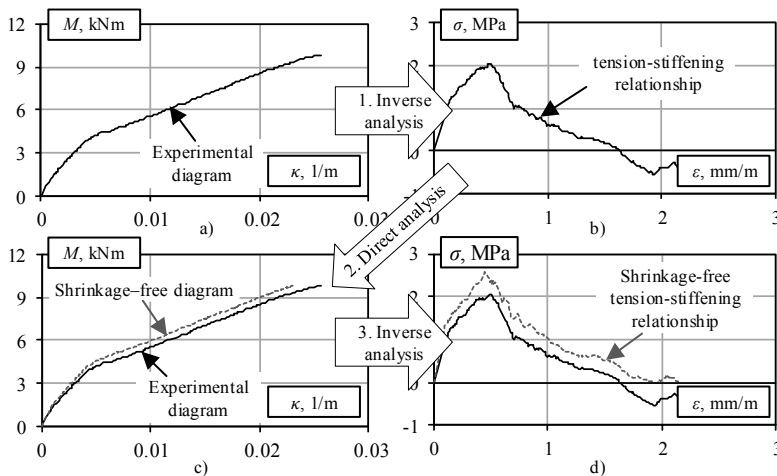


Fig. S4.1. Three step obtaining of the shrinkage free stress-strain diagram of reinforced lightweight concrete in tension

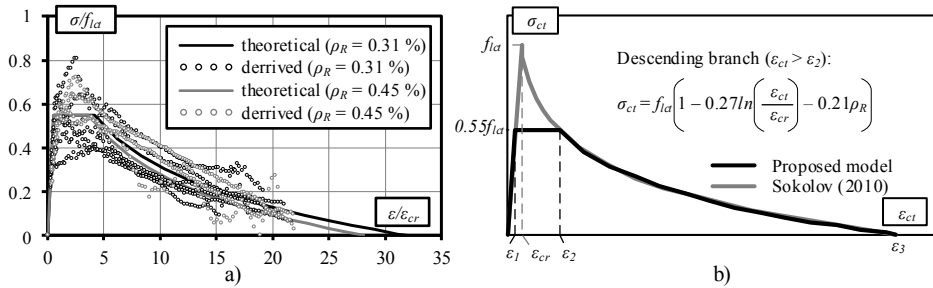


Fig. S4.2. Tension-stiffening model of structural lightweight concrete: a) normalized stress-strain diagrams obtained for the selected beams and b) theoretical expression

Selected and normalized experimental points of tension stiffening curves which correspond to the data of beams with different reinforcement ratios are presented in Fig. S4.2a. During the analysis of the obtained results it was noticed that a form of descending branch of tension stiffening curve is well described by Sokolov (2010) derived the tension stiffening model for beams of traditional concrete. However, it is noticed that the maximum tensile strength of tension stiffening diagram is on average 45% lower than the theoretically calculated tensile strength of lightweight concrete according to the norms EC2.

Based on the data received, this study suggests a modification of the Sokolov (2010) constitutive model to represent the decay of ultimate tension-stiffening stresses in lightweight concrete beams. The governing assumption of the proposed modification is that a reduction of the maximum tensile stress represents the effect of lightweight aggregates. Figure S4.2b sketches the modified tension-stiffening law with expressions of the characteristic points. Unlike the original model which has ascending and descending branches, the proposed tension-stiffening diagram shown by the black solid line has a tri-linear shape. The ascending branch of the diagram governs the elastic deformation behaviour of the concrete, whereas the horizontal line and the descending branch represent the crack formation and bond degradation stages. The maximum tensile stress σ_{ct} was taken as $0.55f_{lct}$, as shown in Figure 4b. The corresponding elastic strain is defined by the formula (S4.1):

$$\epsilon_1 = 0.55\epsilon_{cr}, \quad (S4.1) \quad \epsilon_2 = \epsilon_{cr} e^{1.667-0.78\rho_R}, \quad (S4.2) \quad \epsilon_3 = \epsilon_{cr} e^{3.7-0.78\rho_R}, \quad (S4.3)$$

where ϵ_{cr} ($\epsilon_{cr} = f_{ct} / E_{lcm}$) is the theoretical cracking strain assumed as the ratio of the tensile strength and elasticity modulus. The two latter parameters are assessed by EC2 based on the experimentally determined compressive strength and concrete density. The strain characterizing the horizontal branch of the tension-stiffening diagram can be assessed by the formula (S4.2), where ρ_R is the reinforcement ratio. Strain of the descending branch, where reinforced concrete takes no more tensions, can be calculated according to formula (S4.3).

Figure S4.2a shows a comparison of the tension-stiffening law with the stress-strain diagrams of nine test beams having different reinforcement ratios and concrete strengths. Good agreement between the test and predicted results can be stated based on the comparison of the area below the stress-strain relations because the difference was below 1%.

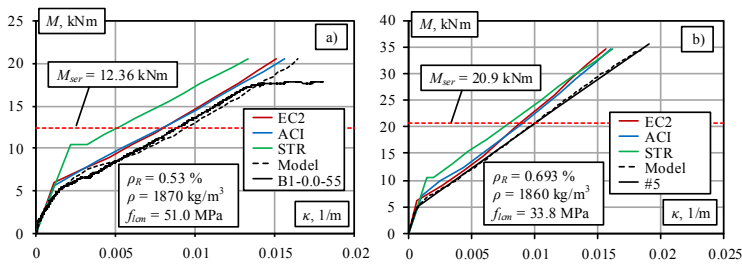


Fig. S4.3. Comparison of theoretical and experimental moment-curvature diagrams:
a) Carmo *et al.* (2013); b) Sin *et al.* (2011)

Adequacy of the proposed tension stiffening model was checked using the experimental results published in literature for lightweight concrete elements. Database consisted of 51 flexural elements, which were published by Carmo *et al.* (2013), Sin *et al.* (2011), Bernardo *et al.* (2016), Wu *et al.* (2011) and Vakhshouri (2017). Reinforcement ratio for analysed elements ranged from 0,33 to 2,82%, density from 1651 to 2000 kg/m³, and concrete compressive strength from 20.0 to 70.1 MPa. Analysis was performed using nonlinear calculation finite elements program ATENA. Proposed tension stiffening model (Fig. S4.2b) was used to describe behaviour of lightweight concrete material under tensile strength. Shrinkage strains which had appeared before stage of loading were evaluated by a calculation. The modelling results of the two selected beams are presented in Fig. S4.3 together with experimental moment and curvatures diagrams and theoretical curves which were calculated according to design norms EC2, ACI and STR. The results are compared at service load $M_{serv} = 0.6M_{Rm}$. The statistical comparative analysis of the results obtained showed that the average relative margin of error of theoretical and experimental deflection calculation is 2.7%. The following margins of error were obtained by the methods of design norms: EC2 – 14.3%, STR – 16.5%, ACI – 12.9%.

After the model adequacy check, the full size normal-weight (NB) and lightweight concrete (LB) structures were analysed numerically and compared between themselves. First of all, slabs with a span of 6 meters from normal concrete were designed according to norms EC2, exposed to 2.5 kPa and 5.0 kPa loads of pedestrian crowds. Two different reinforcement ratios were obtained: 0.3% and 0.4%. Later on, the C30/37 class concrete used to design normal concrete was changed into lightweight LC30/33 class concrete with the same compressive strength, the density of which $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$. Using the proposed reinforced concrete tension stiffening model for lightweight concrete slabs and original Sokolov (2010) model for normal concrete slabs, numerical analysis by finite element program was performed for the designed elements. This analysis revealed that the normal and lightweight concrete give similar deflection values from the characteristic temporary load: for reinforcement ratio 0.30% 2.2 mm and 3.0 mm deflection values were obtained respectively for normal concrete and lightweight concrete slabs, for reinforcement ratio 0.40% 9.5 mm and 8.0 mm deflection values were obtained respectively for normal concrete and lightweight concrete slabs. Due to the reduced constant load achieved by using lightweight concrete, a smaller quantity of reinforcement is needed when compared to normal concrete in order to ensure ultimate and serviceability limit states. It was found in

analysed examples that the percentage of reinforcement reduces from 0.30% to 0.27% by changing a normal concrete slab into a lightweight concrete while designing to 2.5 kPa temporary load, and from 0.40% to 0.36 % (Fig. S4.4a) while designing to 5 kPa temporary load. The amount of reinforcement required is reduced by 12% and 10%, respectively.

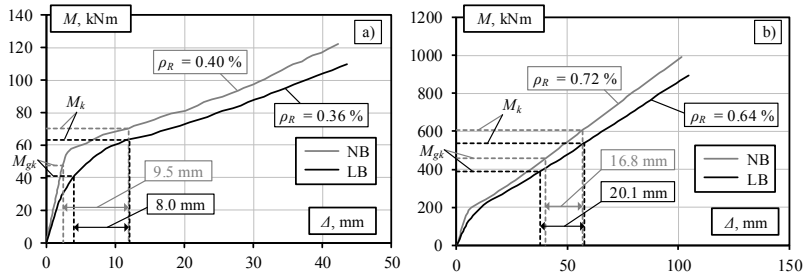


Fig. S4.4. Modelling results of: a) slabs; b) beams

Later on, numerical analysis of 16 m (span of 15.4 m) pedestrian bridge beams (Fig. S4.4b) was performed. Analysis revealed that when M_{gk} (bending moment from constant load) ratio with M_k (bending moment from constant and temporary load) is 0.72 ($M_{gk}/M_k = 0.72$), required quantity of reinforcement decreases by 11%. This happens when lightweight concrete with the same compressive strength is used instead of normal concrete ($\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$). The numerical analysis of slabs and beams revealed that the efficiency of lightweight concrete use for reinforced structures increases accordingly to the increase in M_{gk}/M_k ratio.

General conclusions

1. The literature review revealed that wider use of lightweight concrete for reinforced structures is limited by the lack of reliable physical models and calculation methods. Lightweight concrete is an exclusive material whose properties are determined not only by the aggregates and additives used, but also by the technology of the production of mixes. From this point of view, it is important to apply universal physical models for the analysis of lightweight concrete structures, which allow to evaluate the peculiarities of the behaviour of this material in the whole life cycle.
2. By applying different aggregates during the research, compositions of lightweight concrete mixtures were proposed. Experimental program (44 different self-compacting concrete types were formed) was carried out, showing that the most suitable aggregates for lightweight concrete production are expanded clay and expanded glass.
3. Studies have shown that maintaining the same volume of lightweight aggregate in the mix, but using different amounts of low fraction expanded glass and expanded clay, yields a mix of similar density (difference up to 6%), but different compressive strength (difference up to 26%). The maximum compressive strength is obtained by replacing the expanded clay in a volume from 5% to 20% by expanded glass aggregate.

4. The durability studies of the mixes showed that samples with expanded clay aggregate and blended expanded clay-expanded glass aggregate withstand 200 cycles of freeze-thaw and correspond to the F200 frost resistance class. It has also been found that expanded glass aggregate in lightweight mixes can be applied without restrictions related to alkaline corrosion.
5. 19 lightweight reinforced concrete beams were produced in a laboratory and tested under short-term static load. For some beams very lightweight concrete mixtures (density 1380 kg/m³, compressive strength 30.9 MPa) was used and tests showed that, despite sufficient compressive strength, the low modulus of elasticity of these concretes (11.5 GPa) and high shrinkage strains (-1.05×10^{-3}) limits the practical application of these mixtures to structural elements. This again reveals the need of integrated interdisciplinary research in the development of innovative solutions.
6. The physical model of the cracked reinforced lightweight concrete was obtained by applying the algorithm of inverse task to the experimental elements. This model evaluates the essential characteristic peculiarity of this material – the lower than the traditional concrete cracking limit due to the low mechanical resistance of the lightweight aggregates and the shrinkage strain before the load.
7. The adequacy of the proposed model was verified by applying the finite element program ATENA in the numerical analysis of experimental beams which was conducted by the other authors (data of 51 beams was gathered). The statistical comparative analysis of the obtained results showed that the average relative error of the proposed model for the calculation of theoretical and experimental deflection was 2.7%. The following margins of error were obtained by design norms methods: EC2 – 14.3%, STR – 16.5%, ACI – 12.9%.
8. The proposed constitutive model is adapted to the numerical strain analysis of natural size slabs and beams. The use of lightweight concrete has been found to be effective at a higher ratio of bending moments induced by constant load and total load (M_{gk}/M_k). In this case, the use of lightweight concrete results in a lower amount of required longitudinal reinforcement compared to the corresponding traditional reinforced concrete element. The savings in the amount of reinforcement obtained for the selected structures were up to 12%.
9. The lightweight concrete mixes and the physical model proposed in the thesis may be improved with respect to the resistance of reinforced elements in the diagonal section, long-term aspects of concrete shrinkage and creep and the peculiarities of adhesion of concrete and reinforcement. The proposed constitutive model of structural lightweight aggregate concrete can be used as a reliable tool for the improvement of design code methods. It might be also applied for the numerical deformational analysis of reinforced lightweight concrete elements as an alternative solution to the analytical engineering techniques.

Priedai*

A priedas. Disertacijos autoriaus sąžiningumo deklaracija

B priedas. Bendraautorių sutikimai teikti publikacijose skelbtą medžiagą mokslo daktaro disertacijoje

C priedas. Autoriaus publikacijų disertacijos tema kopijos

* Priedai pateikiami pridėtoje kompaktinėje plokštelėje.

Deividas RUMŠYS

KONSTRUKCINIO ARMUOTO LENGVOJO BETONO LENKIAMŲJŲ
ELEMENTŲ DEFORMACIJŲ ANALIZĖS MODELIS

Daktaro disertacija

Technologijos mokslai,
statybos inžinerija (T 002)

MODEL FOR DEFORMATIONAL ANALYSIS OF REINFORCED
STRUCTURAL LIGHTWEIGHT CONCRETE FLEXURAL MEMBERS

Doctoral Dissertation

Technological Sciences,
Civil Engineering (T 002)

2019 05 13. 14,5 sp. I. Tiražas 20 egz.
Vilniaus Gedimino technikos universiteto
leidykla „Technika“,
Saulėtekio al. 11, 10223 Vilnius,
<http://leidykla.vgtu.lt>
Spausdino UAB „BMK leidykla“
A. Mickevičiaus g. 5, LT-08119 Vilnius